

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

JOÃO PEDRO PALUDO BOCCHI

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO EFEITO DE ESCALA EM BACIAS DE
DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

PORTO ALEGRE

2022

JOÃO PEDRO PALUDO BOCCHI

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO EFEITO DE ESCALA EM BACIAS DE
DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Daniela Guzzon Sanagiotto

Coorientador: Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Paludo Bocchi, João Pedro
ANÁLISE COMPUTACIONAL DO EFEITO DE ESCALA EM BACIAS
DE DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO /
João Pedro Paludo Bocchi. -- 2022.
129 f.
Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto.

Coorientador: Eder Daniel Teixeira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Efeito de escala. 2. CFD. 3. Fluidos
hipotéticos. 4. Ressalto Hidráulico. 5. Bacias de
dissipação de energia. I. Guzzon Sanagiotto, Daniela,
orient. II. Teixeira, Eder Daniel, coorient. III.
Título.

JOÃO PEDRO PALUDO BOCCHI
ANÁLISE COMPUTACIONAL DO EFEITO DE ESCALA EM BACIAS DE
DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 15 de dezembro de 2022.

Prof^a. Dr^a Daniela Guzzon Sanagiotto – IPH/UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH/UFRGS
Coorientador

Prof. Dr. José Carlos Cesar Amorim – IME
Examinador

Prof. Dr. Lucas Camargo da Silva Tassinari – UNISINOS
Examinador

Prof. Dr. Maurício Dai Prá – IPH/UFRGS
Examinador

“[...] E tu para que queres um barco, pode-se saber, foi o que o rei de facto perguntou quando finalmente se deu por instalado, [...]. Para ir à procura da ilha desconhecida, respondeu o homem, Que ilha desconhecida, perguntou o rei disfarçando o riso, como se tivesse na sua frente um louco varrido, dos que têm a mania das navegações, a quem não seria bom contrariar logo de entrada, A ilha desconhecida, repetiu o homem, Disparate, já não há ilhas desconhecidas, Quem foi que te disse, rei, que já não há ilhas desconhecidas, Estão todas nos mapas, Nos mapas só estão as ilhas conhecidas, E que ilha desconhecida é essa que queres ir à procura, Se eu to pudesse dizer, então não seria desconhecida [...]”

(José Saramago, O Conto da Ilha Desconhecida)

RESUMO

O efeito de escala é um fenômeno inerente aos modelos físicos hidráulicos. Este fato ocorre, pois, se os mesmos fluidos que são utilizados nos modelos são os observados no protótipo, para o atendimento do critério de semelhança de Froude, comumente utilizado quando modelados escoamentos a superfície livre, outros critérios de semelhança entram em detrimento, como é o caso dos critérios de Reynolds e Weber, impossibilitando a garantia de uma semelhança dinâmica completa entre modelo e protótipo. A presente pesquisa tem por objetivo investigar o efeito de escala nas pressões médias no fundo uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico utilizando simulações com CFD com fluidos hipotéticos, os quais possuem viscosidade cinemática e tensão superficial fluido-ar alteradas a fim de garantir que os critérios de semelhança de Reynolds e Weber sejam respeitados, além do critério de Froude, já garantido nos modelos físicos hidráulicos que foram avaliados. Para a validação do modelo computacional, foram utilizados dados medidos em modelos físicos nas escalas 1:32, 1:50 e 1:100, além de dados medidos em escala de protótipo, representativos do sistema extravasor de cheias da UHE Porto Colômbia. Nas simulações computacionais foi utilizado o solver Ansys CFX, que resolve numericamente as equações RANS e da continuidade através do método dos volumes finitos. Para a modelagem da turbulência foi utilizado o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ e para a modelagem do escoamento bifásico foi utilizado o método VOF. Os resultados desta dissertação são apresentados em dois artigos. No primeiro foram realizadas comparações entre os resultados obtidos nas simulações que utilizaram água como fluido principal com dados adquiridos nos modelos físicos hidráulicos. Neste artigo foram obtidos resultados satisfatórios para quatro de seis variáveis analisadas e observou-se grande influência do fenômeno de aeração nas outras duas variáveis. No segundo artigo foi realizada a análise do efeito de escala nos valores de pressão média através da utilização de fluidos hipotéticos. Verificou-se que a representação dos efeitos viscosos nos modelos, através da preservação do critério de semelhança de Reynolds, possui maior influência na prevenção do efeito de escala.

Palavras-chave: Efeito de escala. CFD. Fluidos hipotéticos. Bacias de dissipação de energia. Ressalto hidráulico. Ressalto hidráulico submerso.

ABSTRACT

The scale effect is an inherent phenomenon in hydraulic physical models. This occurs because when the same fluids used in the models are observed in the prototype to meet the Froude similarity criteria, which is commonly used when modeling free-surface flows, other similarity criteria such as Reynolds and Weber criteria are compromised, making it impossible to ensure complete dynamic similarity between the model and full-scale structure. The objective of this research is to investigate the scale effect on mean pressures at the bottom of a hydraulic jump stilling basin using CFD simulations with hypothetical fluids. These fluids have altered fluid-air kinematic viscosity and surface tension, ensuring that the Reynolds and Weber similarity criteria are respected, in addition to the Froude criterion, which is already guaranteed in the hydraulic physical models that have been evaluated. For the validation of the computational model, data obtained from physical models at scales of 1:32, 1:50, and 1:100, as well as full-scale data representing the spillway and stilling basin of the Porto Colômbia Hydroelectric Power Plant, were used. The Ansys CFX solver was employed in the computational simulations, numerically solving the RANS and continuity equations using a finite volume method. The RNG $\kappa - \varepsilon$ turbulence model was used for turbulence modeling, and the VOF method was applied for two-phase flow modeling. The results of this study are presented in two papers. In the first paper, comparisons were made between the results obtained in the simulations that used water as the main fluid and data acquired from hydraulic physical models. Satisfactory results were obtained for four out of six analyzed variables, with significant influence observed from the aeration phenomenon on the other two variables. In the second paper, an analysis of the scale effect on mean pressure values was conducted using hypothetical fluids. It was found that preserving the Reynolds similarity criterion in the models, through the representation of viscous effects, has a greater influence in preventing the scale effect.

Keywords: Scale effect. CFD. Hypothetical fluids. Stilling basins. Hydraulic Jump. Submerged Hydraulic Jump.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Representação esquemática do ressalto hidráulico clássico. Corte longitudinal. | 26 |
| Figura 2.2 – Classificação do ressalto hidráulico quanto à posição. | 28 |
| Figura 2.3 – Tipologias de bacias de dissipação por ressalto hidráulico propostas pelo USBR. (a) bacia do tipo II, (b) bacia do tipo III e (c) bacia do tipo IV. | 29 |
| Figura 2.4 – Relações entre Fr e Re para diferentes $We_{0,5}$ e $Mo = 3,89 \times 10^{-11}$ | 38 |
| Figura 3.1 – Vista aérea da barragem da UHE Porto Colômbia. | 50 |
| Figura 3.2 – (a) Bacia de dissipação antes das modificações, apresentando o mapeamento de manifestações patológicas. (b) Bacia de dissipação após as modificações. | 52 |
| Figura 3.3 – Localização dos transdutores de pressão no protótipo. | 53 |
| Figura 3.4 – Transdutor de pressão durante a instalação. | 54 |
| Figura 3.5 – Ensaio realizado no modelo físico em escala 1:32, com vazão equivalente de protótipo de 4.000 m ³ /s. | 55 |
| Figura 3.6 – Ensaio realizado no modelo físico em escala 1:50, com vazão equivalente de protótipo de 4.000 m ³ /s. | 56 |
| Figura 3.7 – Ensaio realizado no modelo físico em escala 1:100, com vazão equivalente de protótipo de 4.000 m ³ /s. | 57 |
| Figura 3.8 – Variáveis medidas e calculadas por Teixeira (2008). | 59 |
| Figura 3.9 – Layout do Ansys Workbench. | 60 |
| Figura 3.10 – Exemplo de malha utilizada nas simulações. | 61 |
| Figura 3.11 – Domínio das simulações e condições de contorno. | 62 |
| Figura 3.12 – Fluxograma resumo de solução do Ansys CFX. | 65 |
| Figura 4.1 – Variáveis típicas de um ressalto hidráulico tipo B. | 73 |
| Figura 4.2 – Domínio de simulação e condições de contorno. | 79 |
| Figura 4.3 – Posições das tomadas de pressão. Medidas apresentadas em metros e em escala de protótipo. | 82 |
| Figura 4.4 – Pressões médias no fundo da bacia de dissipação de energia. Dados em escala de protótipo. | 83 |
| Figura 4.5 – Comparação da equação apresentada por Wiest et al. (2020) com dados obtidos em simulação. | 85 |
| Figura 4.6 – Frações água-ar para as quatro escalas simuladas. | 86 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.7 – Visualização do ponto de estagnação, indicando o fim do rolo do ressalto hidráulico. | 87 |
| Figura 4.8 – Comparação entre a linha d'água simulada com a observada (TEIXEIRA, 2008). | 88 |
| Figura 4.9 – Campo de velocidades para as diferentes escalas. Valores em escala de protótipo. | 90 |
| Figura 5.1 – Posições das medições realizadas nos modelos físicos hidráulicos e no protótipo. | 103 |
| Figura 5.2 – Domínio de simulação e malha utilizada. | 104 |
| Figura 5.3 – Comparação dos dados de pressão média medidos nos modelos físicos hidráulicos (TEIXEIRA, 2008) com os resultados das simulações utilizando água a 25°C como fluido principal. | 108 |
| Figura 5.4 – Resultados das simulações utilizando água como fluido principal para as três escalas de modelo e para o protótipo. | 109 |
| Figura 5.5 – Resultados das simulações utilizando fluídos hipotéticos e comparação com dados medidos em escala de protótipo (TEIXEIRA, 2008). Em (a), simulações em escala 1:32; em (b) escala 1:50 e; em (c) escala 1:100. | 111 |
| Figura 5.6 – Relação entre as pressões médias em escala de modelo obtidas nas simulações com as pressões médias medidas no protótipo. | 114 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 – Relação qualitativa de efeitos e principal importância de alguns parâmetros adimensionais. | 31 |
| Quadro 2.2 – Relações de escala entre variáveis e parâmetros adimensionais. | 34 |
| Quadro 2.3 – Relações de escala entre variáveis e parâmetros adimensionais com o mesmo fluido no modelo e no protótipo..... | 34 |
| Quadro 2.4 – Abordagens para simulação de escoamentos turbulentos. | 42 |
| Quadro 2.5 – Resumo dos modelos de turbulência utilizados nos trabalhos verificados por Viti, Valero e Gualtieri (2018). | 44 |
| Quadro 3.1 – Resumo comparativo das características geométricas do protótipo e dos modelos da UHE Porto Colômbia..... | 49 |
| Quadro 3.2 – Características físicas dos fluidos a serem simulados. | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.1 – Comparação das pressões médias entre dados observados (TEIXEIRA, 2008) e simulados. Valores em escala de protótipo. | 84 |
| Tabela 4.2 – Comparação entre os valores de h_1 calculados por Teixeira (2008) com os resultados das simulações. | 85 |
| Tabela 4.3 – Comparação entre o comprimento do rolo do ressalto hidráulico simulado com o calculado por equações empíricas. | 87 |
| Tabela 4.4 – Comparação entre as velocidades de montante do ressalto hidráulico calculadas por Teixeira (2008) e obtidas em simulação. | 90 |
| Tabela 5.1 – Características dos fluidos utilizados nas simulações. | 107 |
| Tabela 5.2 – Erros percentuais relativos entre os resultados das simulações e os dados medidos em protótipo (TEIXEIRA, 2008). | 112 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| g | Aceleração gravitacional |
| h | Profundidade do escoamento |
| h_c | Profundidade crítica |
| h_1 | Altura conjugada rápida do ressalto hidráulico |
| h_2 | Altura Conjugada lenta do ressalto hidráulico |
| h_2^* | Altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (Calculada pela Equação de Bélanger) |
| i, j | Índices da notação indicial |
| p | Pressão (em equações tridimensionais) |
| q | Vazão específica por unidade de largura |
| r_α | Fração de volume |
| t | Tempo (variável independente) |
| u | Velocidade (em equações tridimensionais) |
| \bar{u} | Velocidade média |
| u' | Flutuação da velocidade |
| x | Dimensão espacial cartesiana |
| $CIRA$ | Cota de Início do Ressalto Afogado |
| F | Força |
| G_B | Geração da energia cinética turbulenta (causada pela flutuabilidade) |
| G_κ | Geração da energia cinética turbulenta (causada pelo gradiente médio de velocidade) |
| G_0 | Abertura da comporta |
| H_1 | Energia total a montante do ressalto hidráulico |
| H_2 | Energia total a jusante do ressalto hidráulico |
| H_L | Perda de carga no ressalto hidráulico |
| L | Comprimento característico qualquer |
| L_r | Comprimento do rolo do ressalto hidráulico |
| N_j | Nível de jusante |

| | |
|---------------------------|--|
| N_M | Nível de montante |
| P | Pressão (em equações unidimensionais) |
| P_{GO} | Posição do centro da abertura da comporta |
| S | Submergência |
| S_κ, S_ε | Termos fonte |
| T_W | Profundidade do escoamento a jusante da bacia de dissipação |
| V | Velocidade (em equações unidimensionais) |
| V_T | Volume total do volume finito |
| V_α | Volume ocupado pela fase α |
| Z | Distância vertical entre a bacia de dissipação e posição de início do ressalto hidráulico afogado na calha do vertedor |
| Eu | Número de Euler |
| Fr | Número de Froude |
| Mo | Número de Morton |
| Re | Número de Reynolds |
| We | Número de Weber |
| α | Inclinação da calha do vertedouro (em âmbito geométrico) |
| α | Fração fluido-ar (em âmbito computacional) |
| γ | Peso específico |
| ε | Dissipação da energia cinética turbulenta |
| κ | Energia cinética turbulenta |
| λ | Fator de escala |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| ν | Viscosidade cinemática |
| π | Parâmetro adimensional qualquer |
| ρ | Massa específica |
| ρ_m | Densidade da mistura |
| ρ_α | Densidade material |
| $\tilde{\rho}$ | Densidade efetiva |

| | |
|---------------|---|
| σ | Tensão superficial |
| ω | Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta |
| Ψ | Pressão média adimensionalizada |
| Γ | Posição do ressalto adimensionalizada |
| δ_{ij} | Delta de Kronecker |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DNS | Direct Numerical Simulation |
| GCI | Grid Convergence Index |
| IPH | Instituto de Pesquisas Hidráulicas |
| LES | Large Eddy Simulation |
| RANS | Reynolds Averaged Navier-Stokes |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| UHE | Usina Hidrelétrica |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 21 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 23 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 23 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 23 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 24 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 25 |
| 2.1 | RESSALTO HIDRÁULICO E BACIAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA . | 25 |
| 2.2 | MODELOS FÍSICOS HIDRÁULICOS E EFEITO DE ESCALA..... | 30 |
| 2.3 | CFD E RESSALTO HIDRÁULICO..... | 40 |
| 3 | SÍNTESE DO TRABALHO REALIZADO | 48 |
| 3.1 | DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS FÍSICAS | 48 |
| 3.1.1 | Protótipo – Escala 1:1 | 49 |
| 3.1.2 | Modelo em Escala 1:32 | 54 |
| 3.1.3 | Modelo em Escala 1:50 | 55 |
| 3.1.4 | Modelo em Escala 1:100 | 56 |
| 3.1.5 | Variáveis Medidas e Calculadas | 57 |
| 3.2 | CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL..... | 60 |
| 3.3 | AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES EM CFD COM FLUÍDOS HIPOTÉTICOS | 66 |
| 4 | AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE RESSALTO HIDRÁULICO SUBMERGIDO EM DIFERENTES ESCALAS | 69 |
| 4.1 | RESUMO..... | 69 |
| 4.2 | INTRODUÇÃO | 70 |
| 4.3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 72 |
| 4.3.1 | Pressões Médias no Fundo da Bacia de Dissipação | 73 |
| 4.3.2 | Alturas Conjugadas | 74 |
| 4.3.3 | Posição de Início do Ressalto Afogado | 75 |
| 4.3.4 | Comprimento do Rolo | 75 |
| 4.3.5 | Linha d'Água | 77 |
| 4.3.6 | Análise de Velocidades | 78 |
| 4.4 | METODOLOGIA..... | 78 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4.5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 82 |
| 4.6 | CONCLUSÕES | 91 |
| 4.7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 92 |
| 5 | EFEITO DE ESCALA DAS PRESSÕES MÉDIAS NO FUNDO DE UMA BACIA DE DISSIPÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO VIA ABORDAGEM COMPUTACIONAL..... | 97 |
| 5.1 | RESUMO..... | 97 |
| 5.2 | INTRODUÇÃO | 98 |
| 5.3 | METODOLOGIA..... | 101 |
| 5.3.1 | Características da Modelagem Computacional..... | 103 |
| 5.3.2 | Modelagem Utilizando Fluidos Hipotéticos | 105 |
| 5.4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 107 |
| 5.4.1 | Simulações Utilizando Água como Fluido Principal..... | 107 |
| 5.4.2 | Simulações Utilizando Fluidos Hipotéticos | 110 |
| 5.5 | CONCLUSÕES | 116 |
| 5.6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 117 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 121 |
| 7 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 123 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 124 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de modelos físicos hidráulicos é uma ferramenta de grande utilidade para avaliar parâmetros e padrões do escoamento, sejam eles representativos de ambientes naturais - como rios, lagos, estuários, entre outros - ou de estruturas construídas (HELLER, 2011; YALIN, 1971). Em síntese, a análise via modelos físicos hidráulicos consiste em executar o objeto de estudo, ou parte dele, em uma escala geométrica diferente em relação ao objeto original, instrumentá-lo e realizar medições e observações do escoamento nessa estrutura em escala alterada, geralmente reduzida quando se trata de modelos físicos hidráulicos. Dessa maneira, com vistas de elucidar as terminologias que serão utilizadas no texto do presente documento, o objeto em escala original será denominado protótipo, enquanto os objetos em escalas reduzidas são denominados modelos.

Além da forma analítica, a análise via modelos físicos hidráulicos representa, provavelmente, uma das ferramentas mais antigas de dimensionamento na engenharia hidráulica (PFISTER; CHANSON, 2012). Para que as medições realizadas nos modelos sejam representativas e úteis para a previsão dos parâmetros de interesse em escala de protótipo, espera-se que o modelo e o protótipo sejam mecanicamente semelhantes. A semelhança mecânica completa - que pode ser subdividida em semelhança geométrica, cinemática e dinâmica - é muito difícil, quiçá impossível em modelos físicos hidráulicos, de ser respeitada. Assim, na elaboração de um modelo físico é admissível que haja relaxação de algum critério de semelhança.

Segundo Heller (2011), as principais diferenças encontradas entre as medições do protótipo e do modelo, já levando em consideração as diferenças de escala entre ambos, são ocasionadas por três principais efeitos, sendo eles: efeitos de modelo, efeitos de medição e efeitos de escala. Os efeitos de modelo são os efeitos causados por simplificações adotadas no modelo físico hidráulico na representação real do sistema hidráulico, tal como a adoção de modelos seccionais para a representação de fenômenos tridimensionais. Os efeitos de medição referem-se às incertezas ou erros que podem estar presentes nas medições realizadas em modelos físicos hidráulicos, tal erros de calibração dos equipamentos de instrumentação, influencias ambientais e erros humanos na medição. Já o efeito de escala, em síntese, é um

fenômeno que ocorre quando se utilizam no modelo os mesmos fluidos observados no protótipo.

A não representação da semelhança mecânica completa, citada anteriormente, está relacionada ao último grupo destes efeitos, ou seja, o efeito de escala. Nos modelos físicos hidráulicos estes efeitos são inerentes e isso se dá pelo fato de que os fluidos atuantes no protótipo são, na maioria das vezes, os mesmos fluidos utilizados nos modelos.

A variação da escala geométrica somada a não variação dos fluidos, ou seja, preservando-se as propriedades físicas dos mesmos - como massa específica, viscosidade e tensão superficial - no modelo e no protótipo, resulta diretamente na preferência de um critério de semelhança em relação a outro. Os principais critérios de semelhança utilizados em modelos físicos hidráulicos serão abordados no item 2.2, apresentado na sequência.

Portanto, observa-se que os efeitos de escala são uma limitação inerente aos modelos físicos hidráulicos e, para suprir essa deficiência, algumas estratégias podem ser adotadas. Heller (2011) apresenta um compêndio de limitações de escalas geométricas, para diversos fenômenos e situações na engenharia hidráulica.

Assim, limitar a escala geométrica do modelo a certo valor, conforme o fenômeno a ser estudado, mostra-se uma estratégia para tornar os efeitos de escala negligenciáveis ou, de certa maneira, dentro de limites aceitáveis. Entretanto, por vezes essa limitação para prevenção da ocorrência de majorados efeitos de escala resulta na adoção de escalas geométricas exageradas nos modelos, tornando-os financeiramente onerosos e impraticáveis, ou ainda sem infraestrutura laboratorial para abrigá-los ou sistemas de bombeamento para alimentá-los. Ainda, outra estratégia para a avaliação do efeito de escala é experimentar mais de um modelo em diferentes escalas e, somado a ferramentas estatísticas, extrapolar os parâmetros para escala de protótipo. Entretanto, a construção de mais de um modelo também é dispendiosa.

Uma maneira alternativa de avaliar parâmetros do escoamento em estruturas hidráulicas é por meio da simulação computacional. Neste método, leis matemáticas que descrevem o escoamento são atribuídas por meio de modelos representados por equações diferenciais ordinárias e parciais. Em caso de não haver uma solução analítica, soluções numéricas são encontradas para solucionar os modelos matemáticos. Devido à complexidade dessas soluções e às suas características

iterativas, a implementação computacional é altamente eficiente, minimizando o esforço de cálculos repetitivos.

Dentre as simulações computacionais, destacam-se as Simulações Fluidodinâmicas Computacionais (CFD, do acrônimo em língua inglesa *Computational Fluid Dynamics*, sigla amplamente difundida). As simulações em CFD possuem, em linhas gerais, associação com as Equações de Navier-Stokes e da Continuidade como modelo matemático para equações de transporte.

Entretanto, as simulações em CFD também possuem limitações. Os modelos, tanto matemáticos quanto numéricos, devem ser validados e ter seus erros inerentes mensurados ou se ter a ciência de que os mesmos estão presentes na avaliação de seus resultados. Ainda, por vezes as condições de simulações são tão complexas e minuciosas que o custo computacional extrapola a capacidade disponível, seja ela em memória ou tempo hábil de simulação. Sobretudo, atribuir um modelo matemático correto, que represente de maneira eficiente os fenômenos desejáveis na análise, não é um exercício trivial.

Por fim, dentre os diversos fenômenos e padrões de escoamentos observados na engenharia hidráulica, destaca-se, sobremaneira, o ressalto hidráulico (CHANSON, 2015; DE PADOVA; MOSSA, 2021; HAGER, 1992). O ressalto hidráulico apresenta-se como um fenômeno fascinante para engenheiros e cientistas, parte por suas características bifásicas e turbulentas, as quais possuem grande aplicação, como na mistura de reagentes em estações de tratamento de água e na dissipação de energia em sistemas de segurança de barragens.

O ressalto hidráulico é um fenômeno físico que estimula investigações há muitas gerações de cientistas, sendo datado, por exemplo, o desenvolvimento da equação de Bélanger nas proximidades do primeiro terço do século XIX. Também são datados os estudos de Bidone no mesmo período (DE PADOVA; MOSSA, 2021). Este fenômeno, após conhecidas as condições para o seu controle e utilização, mostrou-se de grande conveniência para aplicações na engenharia, como é o caso das bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico, ora apresentadas. Primeiramente descrito de maneira observacional através da instrumentação de modelos físicos hidráulicos, os ressaltos hidráulicos agora também são passíveis de investigações computacionais, sendo este último grupo de resultados datados principalmente no final do século XX e, atualmente, no século XXI (DE PADOVA; MOSSA, 2021). Assim, percebe-se o quão instigante e vigente é o estudo de ressaltos hidráulicos.

A presente pesquisa relaciona-se com as bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico. Estas estruturas promovem a dissipação da energia cinética turbulenta, oriunda da energia potencial da água armazenada no reservatório de uma barragem, através do fenômeno do ressalto hidráulico, evitando possíveis manifestações patológicas na própria estrutura devido à alta velocidade do escoamento ou em trechos logo a jusante do dissipador.

Portanto, a dissertação ora apresentada engloba três grandes tópicos apresentados neste capítulo introdutório, sendo eles: ressaltos hidráulicos, efeito de escala e simulações em CFD. Com vistas a compreender o efeito de escala em bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico, a presente pesquisa visa apresentar uma proposta de trabalho para a avaliação do efeito de escala via simulações em CFD com a adoção de fluidos hipotéticos nas simulações, com variações de sua viscosidade e tensão superficial. A adoção desses fluidos visa garantir o cumprimento dos critérios de semelhança de Reynolds e Weber entre modelos e protótipo, além do critério de Froude, comumente já respeitado em modelos físicos hidráulicos.

A apresentação dos fluidos hipotéticos supracitados, bem como os valores numéricos de massa específica, viscosidade e tensão superficial a serem adotados, será realizada e elucidada no decorrer do presente texto.

As simulações serão representativas do sistema extravasor de cheias da Usina Hidrelétrica (UHE) de Porto Colômbia, o qual é formado por um vertedouro de soleira controlada por comportas segmento, seguido por uma calha rápida e uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, este ocorrendo de forma submergida. Serão realizadas simulações nas escalas geométricas 1:1 (protótipo), 1:32, 1:50 e 1:100. A escolha pela geometria do sistema extravasor de cheias da UHE Porto Colômbia se deu pelo fato da existência de dados de pressão medidos no fundo da bacia de dissipação na escala de protótipo (dados incomuns de serem encontrados pela dificuldade de instrumentação *in loco*), bem como medições em modelo nas outras escalas supracitadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme apresentado no item anterior, os modelos físicos hidráulicos possuem certas limitações, principalmente no que tange às manifestações de efeitos de escala expressivos quando ensaiados modelos em escalas muito reduzidas, de

acordo com o fenômeno a ser observado. Dependendo de que parâmetro do escoamento está sendo avaliado na instalação experimental, por vezes torna-se necessária a adoção de grandes escalas na construção do modelo para evitar efeitos de escala majorados. Esse fato reflete custos monetários elevados, não só na instalação e operação do modelo em si, mas em toda a infraestrutura necessária para abrigá-lo e operá-lo.

Ainda, simulações em CFD de ressaltos hidráulicos são objetos recentes de pesquisa e a geração e divulgação científica dos resultados mostram-se de grande importância para ampliar o conhecimento na área. Tendo em vista que há uma grande dificuldade de representar de forma completa a turbulência do fenômeno devido ao alto custo computacional envolvido nas simulações, a evolução recente da capacidade de processamento e memória dos computadores corrobora para o desenvolvimento da pesquisa nesta área. Entretanto, a representação de parâmetros médios do escoamento ainda se torna válida e reduz os custos computacionais necessários para as simulações. Ademais, comparar resultados obtidos em modelos computacionais com resultados adquiridos em modelos físicos, apresentando de forma clara as condições utilizadas nas simulações, é de grande valia para o desenvolvimento da ciência na área.

Tendo em vista as limitações apresentadas anteriormente, a dissertação ora apresentada possui como justificativa principal utilizar simulações em CFD como ferramenta para a previsão do efeito de escala em bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico, através da adoção de fluidos hipotéticos nas simulações, de forma a complementar a análise realizada com modelos físicos hidráulicos. Ainda, o teste e apresentação dos resultados numéricos, comparando-os com resultados experimentais, apresenta-se como justificativa parcial para a presente dissertação.

Sobretudo, o presente estudo insere-se no projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Estudo de Concretos para Superfícies Hidráulicas”, desenvolvido no âmbito do programa de P&D ANEEL de maneira cooperada entre Foz do Chapecó Energia, Eletrobrás Furnas e o Laboratório de Obras Hidráulicas, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da presente pesquisa foram subdivididos em dois grupos: objetivo geral e objetivos específicos, que são apresentados na sequência.

1.2.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa possui o objetivo geral de desenvolver simulações em CFD, com variações nas propriedades físicas dos fluidos em fase líquida utilizados nas simulações, para análise do efeito de escala nas pressões médias no fundo de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico.

Ainda, para cumprir o objetivo geral supracitado, alguns objetivos específicos devem ser realizados, os quais serão apresentados no item em sequência.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são indexados e apresentados abaixo:

- (i) Definir as condições de simulação a serem utilizadas, de forma que representem satisfatoriamente os parâmetros desejados;
- (ii) Comparar os resultados obtidos nas simulações com CFD que utilizaram água como fluido principal com resultados experimentais de uma estrutura em quatro escalas diferentes, sendo elas: protótipo (1:1), 1:32, 1:50 e 1:100;
- (iii) Realizar simulações com fluidos hipotéticos que busquem o atendimento dos critérios de semelhança de Reynolds e Weber, separadamente e concomitantemente, além do critério de Froude, entre os modelos e o protótipo;
- (iv) Verificar, entre os atendimentos aos critérios de semelhança de Reynolds e Weber, de forma separada e concomitante, qual possui maior influência no efeito de escala com relação às pressões médias no fundo de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico submerso.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação ora apresentada está redigida em formato de dois artigos, onde o primeiro visa atender os objetivos específicos (i) e (ii) apresentados no subcapítulo anterior e o segundo busca o atendimento dos objetivos específicos (iii) e (iv). O primeiro artigo está contido no Capítulo 4 desta dissertação, enquanto o segundo é apresentado no Capítulo 5.

Todavia, além do capítulo introdutório (Capítulo 1) e dos capítulos referentes a cada um dos artigos, conforme descrito acima, a dissertação conta também com um capítulo referente à revisão bibliográfica (Capítulo 2), com um capítulo apresentando uma síntese deste processo (Capítulo 3), com considerações finais (Capítulo 6) e com as referências bibliográficas utilizadas (Capítulo 8).

Ressalta-se que revisão teórica, descrição metodológica, resultados, discussões e considerações finais referentes a cada um dos artigos, se encontram de maneira detalhada em seus capítulos específicos, bem como as referências bibliográficas utilizadas especificamente para cada um deles.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir dos itens apresentados a seguir, será estruturada uma revisão bibliográfica que servirá como fundamentação teórica para a presente dissertação. Assim, esse capítulo estrutura-se em três subseções, sendo estas: 2.1 - Ressalto Hidráulico e Bacias de Dissipação de Energia, 2.2 - Modelos Físicos Hidráulicos e Efeito de Escala e 2.3 - CFD e Ressalto Hidráulico. Esse capítulo de revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar ao leitor uma visão geral sobre os tópicos que compõem a dissertação. Entretanto, revisões bibliográficas mais específicas serão apresentadas nos capítulos específicos de cada um dos artigos propostos. Ainda, detalhes mais específicos sobre a modelagem computacional utilizada podem ser encontrados no capítulo 3.

2.1 RESSALTO HIDRÁULICO E BACIAS DE DISSIPÇÃO DE ENERGIA

O ressalto hidráulico, no estudo da hidráulica de escoamentos em superfície livre, é um fenômeno correspondente a um escoamento bruscamente variado, onde ocorre uma transição abrupta entre um escoamento supercrítico, a montante, para um escoamento subcrítico, a jusante (HAGER, 1992).

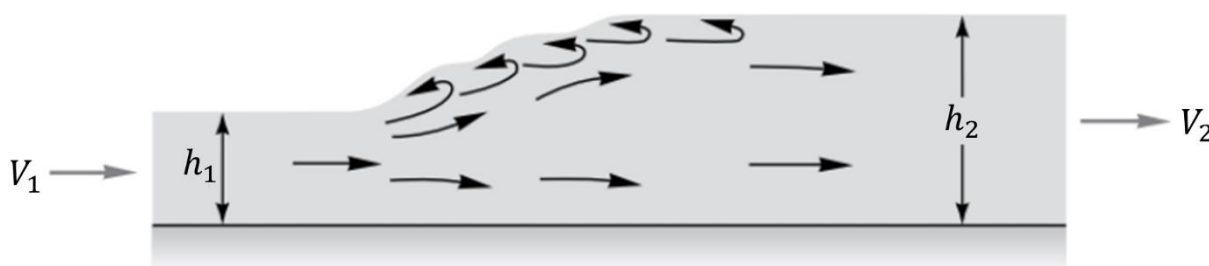
Os termos subcrítico e supercrítico, citados no parágrafo anterior, reportam-se diretamente ao número de Froude, que é um número adimensional representativo da razão entre as forças inerciais de um escoamento pelas forças de campo, representadas pelas forças gravitacionais. Assim, o número de Froude pode ser definido conforme a equação 2.1.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g L}} \quad (2.1)$$

Onde V é uma velocidade característica do escoamento, g é a aceleração gravitacional e L é um comprimento característico do escoamento, no caso de ressaltos hidráulicos, dado pela profundidade da lâmina d'água de montante (h_1) ou jusante (h_2). Ressalta-se que as variáveis devem satisfazer a homogeneidade dimensional, a fim de preservar a adimenssionalidade do número de Froude. Dessa maneira, define-se escoamento supercrítico quando $Fr > 1$, subcrítico quando $Fr < 1$ e crítico quando $Fr = 1$.

Pode-se iniciar a descrição do ressalto hidráulico clássico e de suas características físicas a partir da apresentação de suas características geométricas. Assim, a Figura 2.1 apresenta as características básicas de um ressalto hidráulico clássico.

Figura 2.1 – Representação esquemática do ressalto hidráulico clássico. Corte longitudinal.



Fonte: adaptado de White (2018).

Nota-se que são apresentadas duas seções principais: a seção (1), a montante, supercrítica, com velocidade média V_1 e profundidade do escoamento h_1 ; e a seção (2), a jusante, subcrítica, com velocidade média V_2 e profundidade do escoamento h_2 . Pela equação da continuidade (admitindo escoamento unidimensional, permanente, com fluido homogêneo e incompressível), para um canal retangular de dimensões transversais constantes, sabe-se que a relação $V_1 h_1 = V_2 h_2$ é válida.

A dedução da equação que rege a relação entre as profundidades conjugadas (h_1 e h_2) de um ressalto hidráulico clássico admite certas hipóteses, sendo elas: canal retangular de largura constante com baixa declividade (onde as forças gravitacionais podem ser desprezadas); escoamento unidimensional e permanente; fluido homogêneo e incompressível; forças de pressão hidrostáticas as únicas atuantes em um volume de controle fixo e; coeficientes de Coriolis e de Boussinesq iguais a unidade.

Parte-se da equação da conservação da quantidade de movimento em sua forma integral, dada pela equação 2.2.

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \vec{v} \rho \, dVol \right) + \int_{SC} \vec{v} \rho \vec{v} \, dA \quad (2.2)$$

Onde \vec{F} são as forças envolvidas no sistema; VC indica a integração sobre o volume de controle; SC indica a integração sobre a superfície de controle e; ρ é a massa específica do fluido e; \vec{v} é o vetor relativo à velocidade.

Aplicando as hipóteses supracitadas, a Equação 2.2 pode ser reescrita conforme a equação 2.3.

$$\sum F = F_{P,1} - F_{P,2} = \frac{\gamma h_1^2}{2} - \frac{\gamma h_2^2}{2} = \rho q (V_2 - V_1) \quad (2.3)$$

Onde $F_{P,1}$ e $F_{P,2}$ são as forças de pressão hidrostáticas, por unidade de largura; γ é o peso específico do fluido, no caso, água; ρ é a massa específica do fluido e; q é a vazão unitária, por unidade de largura do canal ($q = Q/B$, onde Q é a vazão e B é a largura do canal).

Após alguns procedimentos algébricos, que serão omitidos no presente texto, a equação 2.3 pode ser rearranjada e reescrita na forma da Equação 2.4.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right) \quad (2.4)$$

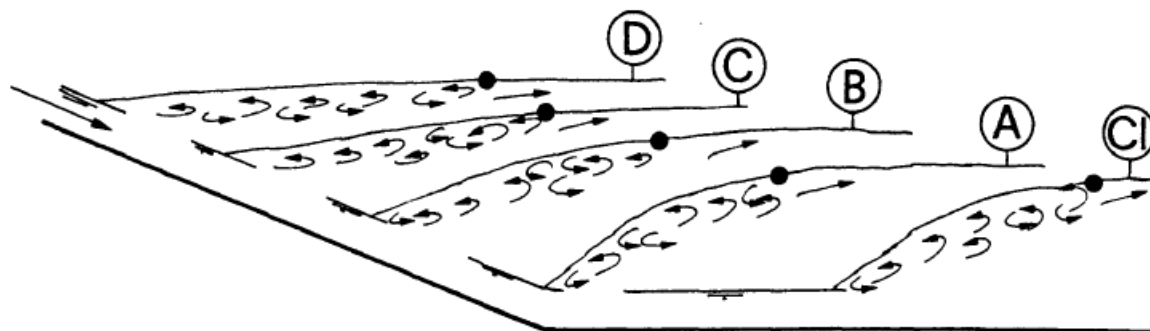
A equação 2.4 é conhecida como Equação de Bélanger, descrita por Jean-Baptiste Bélanger em 1828 (CHANSON, 2009a), utilizada para relacionar as alturas conjugadas em um ressalto hidráulico clássico. O desenvolvimento dessa equação, bem como o entendimento dos parâmetros que a regem, é de suma importância para o entendimento conceitual do ressalto hidráulico.

Diversas são as maneiras de caracterizar ressaltos hidráulicos, quando sua natureza, forma, estabilidade, eficiência de dissipação, entre outras características. O presente estudo trata do ressalto hidráulico que ocorre na bacia de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia, o qual é caracterizado por um ressalto afogado, com o seu início ainda sobre a calha do vertedouro. Assim, a revisão apresentada na sequência terá enfoque nessa tipologia de ressalto hidráulico, compatível ao objeto de estudo.

É de interesse que o ressalto ocorra de maneira afogada em bacias de dissipação de energia, onde o seu início desloca-se ao encontro da calha inclinada do vertedouro. O ressalto hidráulico ocorrendo de maneira afogada garante que o mesmo não propague seus efeitos para jusante da bacia de dissipação, prevenindo erosões tanto na calha do rio, quanto possíveis erosões regressivas no final da bacia de dissipação (CHANSON, 2015).

Dessa maneira, Kindsvater (1944, apud HAGER, 1992) apresentou uma classificação de ressaltos hidráulicos quanto a seu início. A Figura 2.2 apresenta a classificação proposta.

Figura 2.2 – Classificação do ressalto hidráulico quanto à posição.



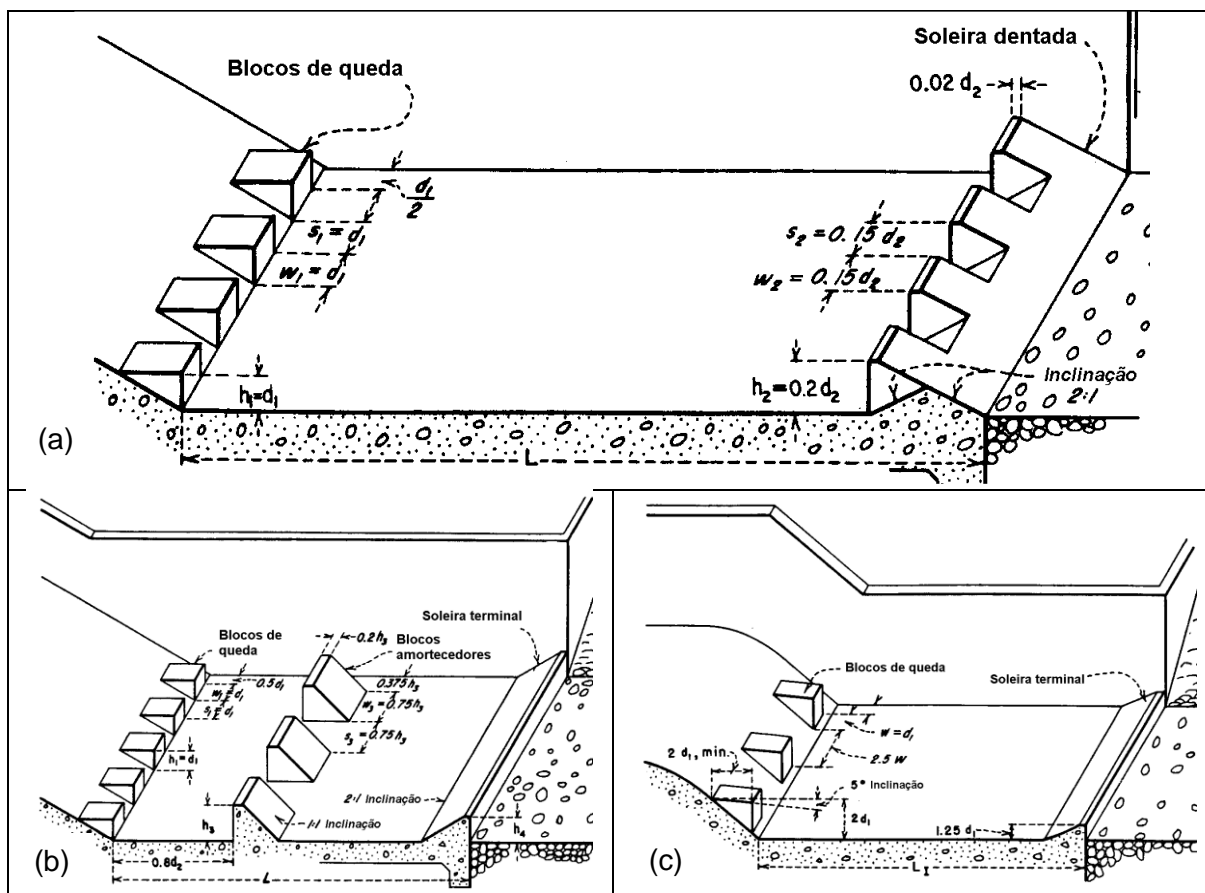
Fonte: Hager (1992).

A classificação proposta por Kindsvater (1944) embasou estudos que se popularizaram no âmbito da engenharia hidráulica, como os estudos de Peterka (PETERKA, 1984) e Rajaratnam (RAJARATNAM, 1965a, 1965b, 1967).

Os ressaltos do tipo D são caracterizados por ocorrerem inteiramente sobre a calha do vertedouro; os ressaltos do tipo C caracterizam-se por iniciarem na calha do vertedouro e possuir o seu final no início da bacia de dissipação; os ressaltos do tipo B caracterizam-se por iniciarem na calha do vertedouro e possuir seu final dentro da bacia de dissipação; os ressaltos do tipo A possuem o seu início no começo da bacia de dissipação e; por fim, o resalto de sigla “Cl” refere-se ao resalto hidráulico clássico, ocorrendo inteiramente na bacia de dissipação.

As geometrias das bacias de dissipação apresentadas por Peterka (1984) popularizaram-se na publicação *Design of Small Dams* (1987), do *United States Bureau of Reclamation* (USBR). O dimensionamento dessas tipologias de bacias de dissipação possuem uma grande base experimental em modelagem física, além de verificações em escala de protótipo (CHANSON, 2015). São apresentados 4 tipos de geometria de bacias de dissipação, onde a opção entre elas durante o processo de dimensionamento parte da análise das variáveis de vazão, velocidades e números de Froude. A Figura 2.3 apresenta as tipologias II, III e IV, propostas pelo USBR, adaptadas por Rodrigues (2002). Ressalta-se que a tipologia I não foi representada por se tratar de uma calha lisa, sem defletores, blocos de queda, soleira terminal, entre outros obstáculos que auxiliam na dissipação de energia.

Figura 2.3 – Tipologias de bacias de dissipação por ressalto hidráulico propostas pelo USBR. (a) bacia do tipo II, (b) bacia do tipo III e (c) bacia do tipo IV.



Fonte: Rodrigues (2002). Adaptado de USBR (1987).

A bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia foi projetada, em um momento inicial, como do tipo II, conforme o USBR. Todavia, devido a manifestações patológicas nos seus primeiros anos de operação, a mesma passou por alterações geométricas, onde foram retirados os blocos de queda da entrada na entrada da bacia de dissipação e a soleira dentada foi substituída por uma soleira terminal (CARVALHO, 2010).

Já os trabalhos de Rajaratnam tiveram grande importância para a descrição de ressalto hidráulicos afogados *per se*, tal como a descrição do fator de submergência. Rajaratnam (1967) descreve o fator de submergência (S) conforme a equação 2.5.

$$S = \frac{T_W - h_2}{h_2} \quad (2.5)$$

Onde h_2 é a altura conjugada lenta do ressalto e T_W é a altura que ocorre a jusante da bacia de dissipação. Marques, Almeida e Endres (1999) também apresentaram uma proposta para o fator de submergência, dado pela equação 2.6.

$$S = \frac{T_W}{h_2} \quad (2.6)$$

O fator de submersão proposto por Marques, Almeida e Endres (1999), bem como as adimensionalizações propostas pelos autores para as pressões médias e para as posições do ressalto hidráulico afogado, foram utilizadas também por Teixeira (2008), trabalho cerne para a descrição dos dados experimentais utilizados na presente dissertação.

2.2 MODELOS FÍSICOS HIDRÁULICOS E EFEITO DE ESCALA

Antes de explorar os aspectos específicos sobre modelagem física hidráulica, é necessário apresentar uma breve revisão sobre parâmetros adimensionais, análise dimensional e semelhança. Assim, nesse item apresentar-se-á uma breve revisão sobre os principais parâmetros adimensionais tangentes ao estudo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, bem como tópicos sobre análise dimensional e semelhança.

A análise dimensional é uma técnica utilizada para reduzir o número de variáveis experimentais a serem analisadas que afetam determinado fenômeno físico, através do agrupamento de variáveis. Ou seja, se um fenômeno depende de n variáveis dimensionais, a análise dimensional reduzirá o problema a k variáveis adimensionais. Em geral, a subtração $n - k$ é igual ao número de dimensões básicas que regem o problema e, no caso de problemas correlatos à mecânica dos fluidos, podem ser consideradas as dimensões de massa [M], comprimento [L], tempo [T] e temperatura [θ] (WHITE, 2018). No presente estudo não foram consideradas variáveis que possuem dimensão de temperatura.

Utilizando-se as variáveis dimensionais descritas por Trierweiler (2006) como as de influência em um ressalto hidráulico e aplicando o Teorema dos Termos Pi de Buckingham, considerando as variáveis h_1 , V_1 e ρ como variáveis de base (ou de escala, conforme nomeado por White (2018)), os seguintes parâmetros adimensionais são obtidos:

$$\frac{P}{V_1^2 \rho} = f \left(\frac{x}{h_1}, \frac{h_2}{y_1}, \frac{L_j}{h_1}, \frac{v}{h_1 V_1}, \frac{g h_1}{V_1^2}, \frac{\sigma}{\rho V_1^2 h_1} \right) \quad (2.7)$$

Alguns dos parâmetros adimensionais obtidos pela análise dimensional e expostos na equação 2.7 podem ser reescritos, preservando sua adimensionalidade,

a fim de tornar sua leitura mais facilitada, mais coerente com bibliografias tradicionais. Estes parâmetros são representados nas equações 2.8, 2.9 e 2.10, além do número de Froude, já apresentado na equação 2.1.

$$Re = \frac{h_1 V_1}{\nu} \quad (2.9)$$

$$We = \frac{\rho V_1^2 h_1}{\sigma} \quad (2.10)$$

$$Eu = \frac{P}{V_1^2 \rho} \quad (2.11)$$

Os parâmetros adimensionais apresentados acima, reescritos dessa forma, são conhecidos com os números de Reynolds (Re), Weber (We) e Euler (Eu), respectivamente. Estes parâmetros, além de representarem grupos adimensionais entre as variáveis supracitadas, possuem significado físico, representando a relação de forças em um escoamento. O Quadro 2.1 apresenta as relações qualitativas de efeitos que os parâmetros adimensionais de Froude, Reynolds, Weber e Euler representam.

Quadro 2.1 – Relação qualitativa de efeitos e principal importância de alguns parâmetros adimensionais.

| Parâmetro | Definição ¹ | Relação qualitativa de forças | Importância |
|--------------------|----------------------------------|--|---|
| Número de Froude | $Fr = \frac{V}{\sqrt{g L}}$ | $\frac{\text{inerciais}}{\text{gravitacionais}}$ | Escoamentos em superfície livre |
| Número de Reynolds | $Re = \frac{L V}{\nu}$ | $\frac{\text{inerciais}}{\text{viscosas}}$ | Quase todos tipos de escoamentos |
| Número de Weber | $We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$ | $\frac{\text{inerciais}}{\text{tensão superficial}}$ | Escoamentos em superfície livre (aeração) |
| Número de Euler | $Eu = \frac{P}{V^2 \rho}$ | $\frac{\text{pressão}}{\text{inerciais}}$ | Cavitação |

¹A variável h relativa aos estudos de ressaltos hidráulicos foram substituídas pela variável L , a fim de representar qualquer dimensão de comprimento.

Fonte: Adaptado de White (2018).

Ainda, pode-se relacionar parâmetros adimensionais entre si, além da construção de novos grupos adimensionais, conforme as variáveis a serem analisadas e os efeitos a serem observados e descritos no fenômeno a ser estudado. No estudo de escoamentos aerados, como é o caso de ressaltos hidráulicos, apresenta-se um novo parâmetro adimensional: o número de Morton (Mo).

O Número de Morton é dado por uma relação entre os números de Reynolds, Froude e Weber, o qual foi descrito por Habermann e Morton (1956) em um experimento avaliando a ascensão de bolhas de ar em diferentes fluidos. Ademais, Pfister e Chanson (2014) apresentam o desenvolvimento deste adimensional de maneira mais aprofundada e discutem o efeito de escala em escoamentos aerados. A equação 2.12 apresenta o número de Morton.

$$Mo = \frac{g \mu^4}{\rho \sigma^3} = \frac{We^3}{Fr^2 Re^4} \quad (2.12)$$

Nota-se que o número de Morton, simplificando os termos de velocidades e comprimentos característicos, depende apenas das características do fluido em análise e da aceleração gravitacional.

Assim, estudar determinado fenômeno hidromecânico ou estrutura hidráulica via análise e instrumentação de um modelo físico hidráulico é uma técnica amplamente consolidada e difundida nas escolas de engenharia de todo o mundo. Em síntese, executa-se a estrutura a ser estudada ou parte dela em uma escala geométrica distinta do protótipo (objeto de estudo escala original, 1:1) e avalia-se o escoamento nesse modelo reduzido através de diversas técnicas. Assim, um modelo físico hidráulico pode ser definido como uma ferramenta para encontrar soluções técnicas e econômicas para problemas apresentados na engenharia hidráulica (HELLER, 2011).

Ainda, para um fenômeno observado no modelo ser suficientemente representativo do fenômeno que ocorre no protótipo, uma série de regras devem ser respeitadas. Essas regras são representadas através de proporções constantes adimensionais e quando as mesmas são respeitadas entre o modelo e o protótipo, pode-se dizer que o modelo possui semelhança, parcial ou completa, com o protótipo (HELLER, 2011; NOVAK et al., 2010; YALIN, 1971). Dentro disso, pode-se dividir a semelhança entre modelos e protótipos em três grandes grupos: semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica (HUGHES, 1993 apud YANG et al., 2019). Abaixo serão descritos estes critérios de semelhança.

- *Semelhança geométrica*: o modelo é deformado geometricamente em relação ao protótipo em todas suas dimensões a partir de uma mesma escala. A equação 2.13 representa a escala geométrica (λ_L).

$$\lambda_L = \frac{L_M}{L_P} \quad (2.13)$$

Onde L_M é uma medida geométrica qualquer em escala de modelo e L_P é esta mesma medida em escala de protótipo. Assim, afirmar que um modelo é geometricamente semelhante ao protótipo significa que todas as suas dimensões geométricas são regidas pelo mesmo critério de escala.

- *Semelhança cinemática*: as velocidades do modelo e do protótipo possuem a mesma direção e sentido, regidas por um fator de escala constante. A semelhança cinemática implica que a forma das linhas de corrente entre o modelo e o protótipo deve ser a mesma.

- *Semelhança dinâmica*: as forças no modelo e no protótipo possuem a mesma direção e sentido, regidas por um fator de escala constante. No Quadro 2.1 são apresentadas as relações de forças que alguns adimensionais representam, mesmo que de forma indireta. Assim, afirmar que modelos e protótipos são dinamicamente semelhantes é afirmar que as escalas representadas pelos parâmetros adimensionais descritos no capítulo anterior também são semelhantes. Portanto, para garantir a semelhança dinâmica, a magnitude dos parâmetros adimensionais deve ser igual entre o modelo e o protótipo, ou seja, $\pi_P = \pi_M$, onde π seria um parâmetro adimensional qualquer, tal como os números de Froude, Reynolds, Weber e Morton.

Na maioria das situações os mesmos fluidos existentes em escala de protótipo são atuantes nos ensaios dos modelos físicos hidráulicos, sendo eles, de maneira geral para estruturas hidráulicas de superfície livre, água e ar. Assim, garantir a semelhança completa (geométrica, cinemática e dinâmica) é impossível quando os mesmos fluidos são utilizados no modelo e no protótipo. Quando um dos parâmetros adimensionais não é respeitado em detrimento de outro parâmetro adimensional, denomina-se que o parâmetro não respeitado sofreu relaxação.

Ainda, o não atendimento, ou atendimento parcial, desses critérios de semelhança resulta no denominado efeito de escala, que será melhor abordado na sequência. Corroborando com essa análise, pode-se fazer uma comparação entre as escalas de velocidade, tempo, vazão e de força, tal como foi realizado para a escala geométrica, apresentada equação 2.13.

Seja A uma variável qualquer e λ_A a relação entre essa variável na escala de modelo pela escala de protótipo, ou seja, $\lambda_A = A_M/A_P$. Considerando que a aceleração gravitacional que age no modelo e no protótipo é a mesma, as seguintes relações podem ser estabelecidas, conforme apresentado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Relações de escala entre variáveis e parâmetros adimensionais.

| Parâmetro de Escala | $Fr_M = Fr_P^1$ | $Re_M = Re_P^2$ | $We_M = We_P$ |
|-----------------------|----------------------------|--|--|
| $\lambda_V = V_M/V_P$ | $\lambda_L^{1/2}$ | $\frac{\lambda_V^{1/2}}{\lambda_L}$ | $\left(\frac{\lambda_\sigma}{\lambda_L \lambda_\rho}\right)^{1/2}$ |
| $\lambda_t = t_M/t_P$ | $\lambda_L^{1/2}$ | $\frac{\lambda_L^2}{\lambda_V}$ | $\left(\frac{\lambda_\rho \lambda_L^3}{\lambda_\sigma}\right)^{1/2}$ |
| $\lambda_Q = Q_M/Q_P$ | $\lambda_L^{5/2}$ | $\lambda_V \lambda_L$ | $\left(\frac{\lambda_\sigma \lambda_L^3}{\lambda_\rho}\right)^{1/2}$ |
| $\lambda_F = F_M/F_P$ | $\lambda_\rho \lambda_L^3$ | $\frac{\lambda_\mu^2}{\lambda_\rho \lambda_L^2}$ | $\frac{\lambda_\sigma}{\lambda_L}$ |

¹ A relação entre os números de Froude admite que tanto o modelo quanto o protótipo estão submetidos à mesma aceleração gravitacional;

² $\nu = \mu/\rho$, onde ν é a viscosidade cinemática, μ é a viscosidade dinâmica e ρ é a massa específica do fluido.

Se os mesmos fluidos são utilizados no protótipo e no modelo, temos que λ_ρ , λ_ν e λ_σ são iguais a unidade ($\lambda_\rho = \lambda_\nu = \lambda_\sigma = 1$). Substituindo essa relação nas informações apresentadas no Quadro 2.2, nota-se que todas as relações se tornam função apenas da escala geométrica, fato usual em modelos físicos. Ainda, nota-se que se os mesmos fluidos são presentes tanto no modelo quanto no protótipo é impossível ter semelhança dinâmica completa, respeitando todas as relações adimensionais apresentadas. O Quadro 2.3 apresenta a substituição citada.

Quadro 2.3 – Relações de escala entre variáveis e parâmetros adimensionais com o mesmo fluido no modelo e no protótipo.

| Parâmetro de Escala | $Fr_M = Fr_P$ | $Re_M = Re_P$ | $We_M = We_P$ |
|-----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| $\lambda_V = V_M/V_P$ | $\lambda_L^{1/2}$ | λ_L^{-1} | $\lambda_L^{-1/2}$ |
| $\lambda_t = t_M/t_P$ | $\lambda_L^{1/2}$ | λ_L^2 | $\lambda_L^{3/2}$ |
| $\lambda_Q = Q_M/Q_P$ | $\lambda_L^{5/2}$ | λ_L | $\lambda_L^{3/2}$ |
| $\lambda_F = F_M/F_P$ | λ_L^3 | λ_L^{-2} | λ_L^{-1} |

Nos modelos físicos hidráulicos que representam escoamentos a superfície livre, como é o caso de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, o critério de semelhança de Froude apresenta grande importância (HELLER, 2017), tal como também apresentado no Quadro 2.1. Ainda, Heller (2011) afirma que o critério de semelhança de Froude é recomendado para fenômenos curtos e altamente

turbulentos, como é o caso de ressaltos hidráulico, desde que a dissipação de energia dependa predominantemente dos esforços cisalhantes turbulentos internos. Assim, geralmente busca-se atender este critério em detrimento de outros.

Nota-se que, dependendo de qual parâmetro adimensional está sendo preservado para análise, outros entram em detrimento, estes - portanto - sofrendo relaxação. Essa é a origem do efeito de escala, que se torna inerente a um modelo físico quando os mesmos fluidos do protótipo são utilizados no modelo (HELLER, 2011).

O efeito de escala pode ser definido como uma consequência da similaridade incompleta entre o modelo e o protótipo, um erro devido à escolha da preservação de uma lei de escala em detrimento de outras. A causa dessa não similaridade pode ser melhor definida como *defeito* de escala (NOVAK et al., 2010). Embora pareçam termos semelhantes, há uma diferença semântica entre os termos. Todavia, utilizar-se-á o termo e definição de *efeito de escala*, mais comumente encontrado em literatura.

Quanto maiores as diferenças na escala geométrica, ou seja, quanto maiores as diferenças dimensionais entre o protótipo e o modelo, mais acentuado é o efeito de escala. Ainda, a magnitude do efeito de escala depende do parâmetro a ser investigado no modelo, uma vez que a importância relativa das diferentes forças atuantes no modelo e no protótipo pode variar (HELLER, 2011).

Portanto, durante a etapa de dimensionamento de um modelo físico hidráulico, a escolha de sua escala geométrica deve levar em conta possíveis manifestações do efeito de escala. Idealmente, a escala geométrica do modelo deve ser suficientemente grande para que os efeitos de escala possam ser negligenciados. Entretanto, limitações econômicas e de infraestrutura laboratorial - tal como disponibilidade de vazão, dimensões físicas do laboratório, equipe técnica e instrumentação - muitas vezes são os fatores limitantes na escolha da escala do modelo.

Ainda, deve-se levar em consideração que os modelos físicos especificamente representativos de fenômenos relacionados à engenharia hidráulica são, de maneira geral, menores do que os objetos de estudo em escala de protótipo, sendo frequentemente denominados modelos reduzidos. Assim, a magnitude de λ transita entre 0 e 1, sendo os modelos com os valores de λ mais próximos de 1 representativos de modelos maiores geometricamente.

Dessa maneira, nos modelos físicos hidráulicos as forças internas do fluido - tal como às oriundas da viscosidade cinemática - apresentam uma dominância maior do que as mesmas forças em escala de protótipo, ocasionando um efeito de escala na forma de amortecimento, ou seja, as forças mensuradas em modelo possivelmente serão menores do que as visualizadas em protótipo (HELLER, 2011).

Conforme abordado anteriormente, no estudo de escoamentos em superfície livre em modelos físicos - e por consequência em bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico - o critério de semelhança de Froude tende a ser respeitado, enquanto outros critérios, tal como de Reynolds e Weber, tendem a sofrer relaxação.

Preservar o critério de semelhança de Reynolds possui mais importância em escoamentos onde as forças viscosas atuam como protagonistas, tal como em escoamentos internos e escoamentos ao redor de cilindros. Chanson (2009b) afirma que em modelos físicos hidráulicos onde o critério de Froude é respeitado em detrimento do critério de Reynolds, manifestam-se números de Reynolds drasticamente menores do que os observados em escala de protótipo.

Ainda, com relação aos ressaltos hidráulicos, resultados experimentais não podem diretamente ser extrapolados para escala de protótipo se no modelo forem apresentados $Re_M < 10^5$, pois grandes efeitos de escala são manifestados (CHANSON, 2009c; MURZYN; CHANSON, 2008).

Em relação ao número de Weber, preservá-lo entre as escalas de modelo e protótipo mostra-se muito importante em escoamentos aerados. Portanto, a ideia de representar em um modelo físico fenômenos com alta incorporação de ar no escoamento, tal como ressaltos hidráulicos, e avaliar essa aeração em escala de modelo, mostra-se deficitário, uma vez que o critério de Weber não é respeitado nos mesmos. Assim, se as forças devido à tensão superficial no modelo apresentarem papel importante - diferentemente do protótipo, onde na maioria das vezes são negligenciáveis - a representação da aeração figura-se prejudicada, com bolhas de ar relativamente maiores e incorporação de ar mais rápida, resultando em medições equivocadas de concentração de ar (CHANSON, 2009b).

Avaliar escoamentos aerados e fenômenos de características bifásicas e multifásicas de maneira geral mostra-se um trabalho desafiador, tanto em modelos físicos quanto em simulações em CFD. Diversas estratégias são utilizadas para representar esses fenômenos em ambas as frentes. Com relação aos modelos físicos

hidráulicos, Chanson (2009b) apresenta uma boa revisão sobre efeito de escala em escoamentos bifásicos água-ar.

Em modelos de Froude, uma estratégia para a atenuação do efeito de escala é estabelecer limitações na escala geométrica dos modelos, conforme o fenômeno a ser estudado. Limitar a escala geométrica, por consequência, significa também limitar grandes discrepâncias nas escalas de forças envolvidas no sistema. Por vezes também são estabelecidos critérios, além da limitação de escala, de lâmina mínima de escoamento para mitigação dos efeitos de tensão superficial (HELLER, 2011).

Heller (2011) apresenta um trabalho de revisão exímio sobre efeito de escala em modelos físicos hidráulicos. Um dos produtos deste trabalho é uma relação de outros trabalhos que apresentam limitações para escalas e/ou outros fatores para diversos fenômenos ensaiados em modelos físicos. Dentre os estudos listados, dois possuem como objeto de investigação o fenômeno do ressalto hidráulico (CHANSON, 2009b; HAGER; BREMEN, 1989).

O trabalho de Hager e Bremen (1989) apresentou como objeto de estudo as alturas conjugadas do ressalto hidráulico. Como critério de prevenção do efeito de escala os autores identificaram que o número de Reynolds na seção de montante do ressalto no modelo deve respeitar a relação $Re_1 < 10^5$ para números de Froude de montante $Fr_1 < 10$, desde que seja respeitada a relação $h_1/B < 0,1$, onde B é a largura do canal.

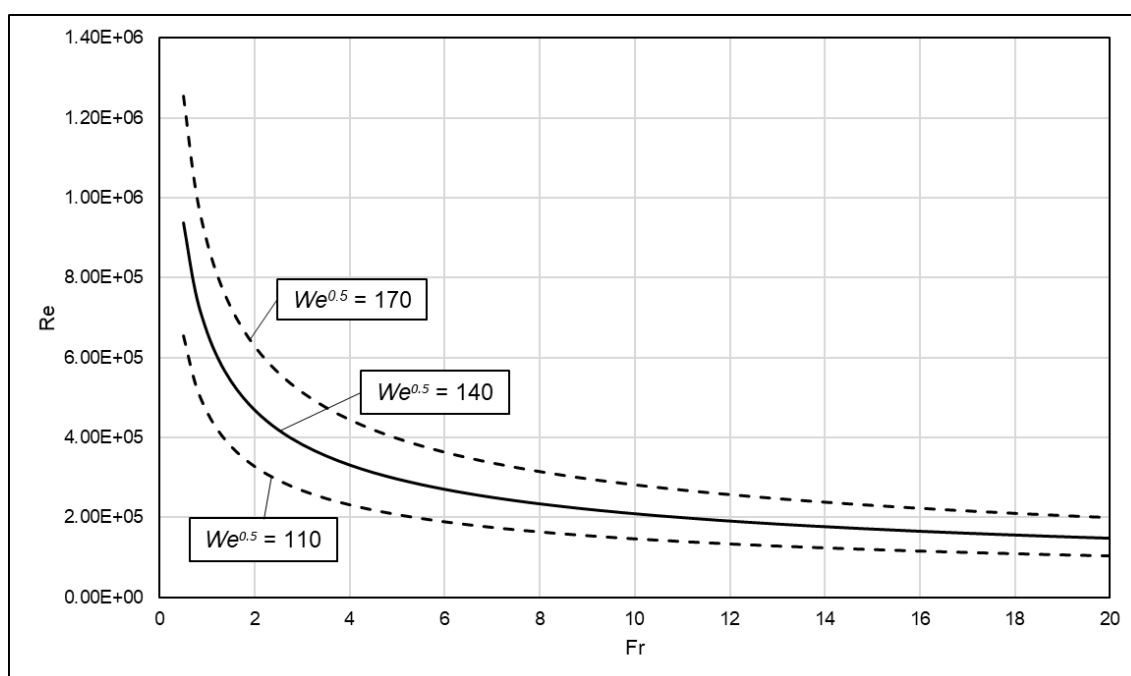
Já o trabalho de Chanson (2009b) avaliou as características bifásicas de ressaltos hidráulicos, investigando fenômenos relacionados à fração de vácuo no rolo do ressalto e a mecânica das bolhas de ar no interior do mesmo. Nesse trabalho o autor estabeleceu como critério limitante para a prevenção do efeito de escala a relação $Re < 10^5$.

Outra análise interessante de ser realizada, para escoamentos aerados, parte do número de Morton, apresentado por Pfister e Chanson (2014). Os autores afirmam que para escoamentos de água à superfície livre, com ambos fluidos (água e ar) em uma temperatura de 15 °C, o número de Morton possui uma magnitude de $3,89 \times 10^{-11}$. Ainda, Pfister e Chanson (2014) afirmam que os efeitos de escala em relação a incorporação de ar no escoamento são mínimos se $We^{0,5} < 140$. Entretanto, os mesmos autores apresentam trabalhos que tornam esse limiar mais restritivo ou brando. Skripalle (1994, apud PFISTER; CHANSON, 2014) apresenta um critério mais

restritivo, com $We^{0,5} < 170$, enquanto Rutschmann (1988, apud PFISTER; CHANSON, 2014) apresenta esse critério de forma mais branda, com $We^{0,5} < 110$.

A partir das assertivas supracitadas pode-se realizar a seguinte análise: fixando $Mo = 3,89 \times 10^{-11}$ e estabelecendo uma faixa de $110 < We^{0,5} < 170$ como limitador para a não ocorrência de efeitos de escala relacionados à concentração de ar, pode-se atribuir uma relação entre os números de Froude e Weber. A Figura 2.4 apresenta essa relação de forma gráfica para uma faixa de $2 < Fr < 20$, sendo essa ampla e usual observada em modelos físicos hidráulicos.

Figura 2.4 – Relações entre Fr e Re para diferentes $We^{0,5}$ e $Mo = 3,89 \times 10^{-11}$.



Fonte: adaptado de Pfister e Chanson (2014).

Também, conforme abordado anteriormente, por vezes outros critérios técnicos são utilizados para a definição das dimensões físicas de um modelo físico e não somente a busca pela negligenciabilidade dos efeitos de escala. Por exemplo, modelos com dimensões físicas exageradas também demandam, pelo critério de semelhança de Froude, grandes vazões, na ordem de $\lambda_L^{5/2}$, conforme apresentado no Quadro 2.3. Nem sempre laboratórios possuem sistemas de recirculação adaptados para vazões extremamente grandes.

Ainda, as dimensões físicas do modelo podem conflitar com outros critérios de infraestrutura laboratorial, como as próprias dimensões físicas das instalações laboratoriais, além de mobilização de equipe e instrumentação qualificada. Assim,

para o atendimento de todos estes critérios, por vezes adotam-se modelos geometricamente menores do que os necessários para negligenciar o efeito de escala, ou, também visando a redução no tamanho do modelo, opta-se pela adoção de modelos seccionais para a representação de fenômenos tridimensionais.

Heller (2011) sintetiza a busca pela redução do efeito de escala em três termos gerais: evasão, compensação e correção. A evasão consiste em limitar valores entre as relações adimensionais a serem respeitados nos modelos físicos, conforme já discutido. Já a compensação é definida por permitir a distorção geométrica parcial dos modelos em um determinado quesito a fim de garantir outros critérios de similaridade, como é o caso da distorção geométrica das rugosidades de canais em favorecimento ao respeito de outras relações de forças mais importantes do escoamento. Por fim, o critério de correção traduz-se no uso de fatores de correção nas medições realizados nos modelos físicos, que possibilitem relacionar os resultados obtidos nos modelos com os resultados observados em protótipo de maneira direta.

Uma outra maneira interessante de buscar o atendimento dos três objetivos supracitados (evasão, compensação e correção) é avaliar o mesmo protótipo em diferentes escalas de modelo físico e, a partir dos dados coletados, realizar um trabalho estatístico para a avaliação do efeito de escala. Teixeira (2008) realizou a avaliação do efeito de escala com dados de pressão no fundo da bacia de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia a partir de medições realizadas em três modelos com diferentes escalas, além da utilização de dados em escala de protótipo. Complementarmente, Teixeira et al. (2012) realizaram uma avaliação do efeito de escala nas pressões médias obtidas no fundo da mesma bacia de dissipação, recomendando escalas mínimas para a avaliação dessa variável em função do número de Froude e da submergência do ressalto.

Heller (2011) afirma que há a possibilidade da utilização de outros fluidos nos modelos, além de água. O autor cita que efeitos de escala significantes devidos à viscosidade cinemática podem ser evitados se ar for utilizado no lugar de água nos modelos. Ainda, os modelos com ar possuem grandes vantagens com relação à instrumentação, onde a turbulência pode ser melhor avaliada através de técnicas de medição com maiores taxas de aquisição de dados, permitindo a descrição de escalas temporais mais refinadas do escoamento.

Entretanto, os efeitos gravitacionais, de superfície livre e cavitação não são reproduzidos em modelos com ar. Nesses modelos as forças inerciais e viscosas são

corretamente representadas, ou seja, o critério de Reynolds é respeitado em detrimento de outros adimensionais (HELLER, 2011).

Nota-se que há a possibilidade da utilização de outros fluidos além da água para a avaliação de fenômenos hidráulicos. Todavia, o modelador fica limitado às características específicas das propriedades físicas de cada fluido, não podendo atender de forma completa todos os critérios de similaridade simultaneamente.

2.3 CFD E RESSALTO HIDRÁULICO

Nos capítulos anteriores foram apresentadas algumas limitações referentes à modelagem física de fenômenos e estruturas hidráulicas. Devido a essas limitações, uma abordagem numérica para o estudo de ressaltos hidráulicos passa a ser um caminho futuro (CHANSON, 2009c, 2009b; DE PADOVA; MOSSA, 2021). Entretanto, nos trabalhos citados os autores apresentam as dificuldades da modelagem computacional, principalmente em relação à modelagem multifásica e aos custos computacionais envolvidos caso se deseje visualizar escalas de turbulência mais refinadas. Portanto, nota-se que a modelagem computacional de fenômenos hidráulicos também possui limitações.

Os modelos matemáticos mais utilizados nas simulações em CFD são os baseados na Equação da Continuidade (equação 2.13) nas Equações de Navier-Stokes (equação 2.14), que são equações diferenciais parciais não-lineares e tridimensionais, as quais descrevem a dinâmica dos fluidos. Abaixo são apresentadas equações supracitadas, para um fluido newtoniano e incompressível, na forma tensorial.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.14)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.15)$$

Onde x e t são as variáveis independentes de espaço e tempo, respectivamente; u é a componente cartesiana da velocidade na direção indicada; p é a pressão; ρ é a massa específica do fluido e; μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Os índices i e j assumem os valores de 1, 2 e 3 na notação tensorial, representativos de cada uma das dimensões cartesianas.

A decomposição de Reynolds é uma maneira comum de abordar as variáveis presentes nas equações supracitadas, onde as variáveis de velocidade e pressão são decompostas a partir de um valor médio somado a uma flutuação. A equação 2.16 apresenta essa decomposição para a velocidade.

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i, t) + u'_i(x_i, t) \quad (2.16)$$

Onde \bar{u}_i é a média da velocidade e u'_i é a parcela de flutuação.

Aplicando a decomposição de Reynolds nos valores instantâneos das equações 2.14 e equação 2.15 e também aplicando o operador médio das equações, além de saber que a média das flutuações é nula e que a média das médias é a própria média, após alguns algebrismos, pode-se chegar nas Equações Médias de Navier-Stokes (RANS, do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*) e da continuidade. As equações 2.17 e 2.18 apresentam essas equações médias.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.17)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \rho \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.18)$$

Nota-se que a equação 2.15 e a equação 2.18 são muito semelhantes, com a diferença que as variáveis médias de velocidade se manifestam no último grupo de equações e do surgimento do termo $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ no último termo da equação 2.18. Esse termo é conhecido como o tensor de tensões de Reynolds e representa a influência das flutuações de velocidade no fluxo médio, ou seja, o mesmo representa a turbulência do escoamento. A hipótese de Boussinesq é utilizada para relacionar o tensor de tensões de Reynolds com os gradientes de velocidade média, utilizando um termo de viscosidade turbulenta, através da seguinte relação, apresentada na equação 2.19.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \varepsilon \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.19)$$

Onde δ_{ij} é o delta de Kronecker. Nota-se que nenhuma equação foi adicionada ao sistema, ao passo que novas variáveis surgiram. Assim, esse último termo deve ser modelado para solucionar as Equações RANS.

Três grandes abordagens principais são utilizadas para a utilização das equações de Navier-Stokes em simulações com CFD, sendo elas: RANS, apresentada acima, *Large Eddy Simulation* (LES) e *Direct Numerical Simulation*

(DNS). Cada uma das abordagens possui suas particularidades, vantagens e desvantagens. Rezende (2009) apresenta uma definição geral e concisa para as abordagens supracitadas.

1. RANS: As equações são obtidas através de um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade. O elemento crítico da modelagem RANS é a representação das tensões de Reynolds, que descrevem os efeitos das flutuações turbulentas de pressão e velocidades;
2. LES: Nessa técnica, as grandes escalas, consideradas como turbilhões que contém energia, são calculadas diretamente e para as pequenas escalas utilizam-se modelos sub-malha. Nesse caso, a formulação é necessariamente transiente e tridimensional;
3. DNS: as equações de Navier-Stokes transientes e tridimensionais são resolvidas sem nenhuma modelagem, em malhas refinadas e com discretizações temporais bem pequenas, a fim de representar todas as escalas turbulentas.

Ainda, essa comparação entre essas abordagens pode ser realizada de maneira mais sistemática, tal como apresentada por Viti, Valero e Gualtieri (2018) e representada no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Abordagens para simulação de escoamentos turbulentos.

| Abordagem | RANS | LES | DNS |
|----------------------|------------------|---|----------------------------|
| Largas escalas | M | S | S |
| Subdomínio inercial | M | S | S |
| Escala de dissipação | M | M | S |
| Acurácia esperada | Variáveis médias | Permite modelagem das escalas inerciais | Até a escala de Kolgomorov |
| Custo computacional | Baixo | Alto | Extremamente alto |

M = Modelado; S = Solucionado.

Fonte: Adaptado de Viti, Valero e Gualtieri (2018).

O avanço na otimização de métodos numéricos e de computadores aumenta o desafio para os modelos de turbulência, onde os mesmos devem buscar resultados cada vez mais precisos, principalmente para escoamentos onde ocorre separação, sobre superfícies complexas e com altos números de Reynolds. Quando ocorre a separação do escoamento de forma acentuada, pode ser possível que modelos baseados nas RANS não sejam mais úteis (SPALART, 2000).

Ressaltos hidráulicos são, em linhas gerais, escoamentos altamente turbulentos, com ocorrência de separação do escoamento e geralmente ocorrem sobre superfícies complexas. Todavia, o presente estudo utilizar-se-á apenas de valores médios das simulações, não visando a avaliação de flutuações de parâmetros e a fiel representação dos parâmetros turbulentos do escoamento. Viti, Valero e

Gualtieri (2018), em um trabalho de revisão, afirmam que simulações com abordagem RANS obtêm acurácias acima de 90% para parâmetros médios do escoamento.

Todavia, pode-se questionar: por que não simular ressaltos hidráulicos via uma abordagem DNS? Conforme mencionado, ressaltos hidráulicos são escoamentos altamente turbulentos, com números de Reynolds superiores a 10^6 , em grande parte dos casos. Simular um escoamento com esse grau de turbulência de maneira direta demanda também representar as escalas temporais e espaciais de turbulência em sua discretização. Bailly e Comte-Bellot (2015) citam que o número total de pontos (n_{dof}) em uma malha para descrever todas as escalas envolvidas no espectro turbulento é diretamente proporcional ao número de Reynolds através da seguinte relação.

$$n_{dof} \propto Re^{9/4} \quad (2.22)$$

Assim, nota-se que descrever escoamentos altamente turbulentos demanda um custo computacional altíssimo, por vezes inexequível até mesmo em computadores e clusters de alta eficiência.

Solucionar os problemas com modelos computacionais menos exigentes pode antecipar uma nova era na modelagem em CFD, possibilitando simulações de escoamentos com altas velocidades e também grandes dimensões até mesmo em computadores pessoais. Assim, torna-se mais viável o uso de simulações em CFD na prática profissional, onde as condições de hardware podem ainda ser limitadas (VITI; VALERO; GUALTIERI, 2018).

Em relação à simulação de ressaltos hidráulicos em CFD, pode-se agrupar os trabalhos publicados em dois grandes grupos: aqueles que visam validar certa técnica numérica para configurações específicas de padrões de escoamento (geralmente técnicas de modelagem da turbulência em RANS) e aqueles que buscam elucidar alguma questão ainda não esclarecida sobre o escoamento em si (LES e DNS) (VITI; VALERO; GUALTIERI, 2018). Todavia, deve-se ponderar os custos computacionais envolvidos em cada uma das abordagens, conforme já discutido.

Modelar ressaltos hidráulicos está, em parte, intimamente ligado à modelagem da turbulência. Conforme apresentado anteriormente, a utilização das equações RANS (equação 2.18) implica na adição de seis novas incógnitas ao sistema de equações utilizados, sendo estas denominadas tensões de Reynolds, que possuem a forma $-\rho \overline{u_i' u_j'}$. Para obter equações somente em termos médios, as tensões de

Reynolds - que levam em conta a parcela devido às flutuações - devem ser modeladas em função de parâmetros do escoamento médio, removendo a relação com as parcelas decorrentes da flutuação (BAILLY; COMTE-BELLOT, 2015).

Gualtieri, Valero e Viti realizaram um trabalho de revisão sobre simulações numéricas de ressaltos hidráulicos. O trabalho foi dividido em duas publicações, onde em uma primeira foram discutidos os dados experimentais para a avaliação de desempenho das modelagens (VALERO; VITI; GUALTIERI, 2018) e na segunda foram apresentados resultados recentes e um vislumbre da situação futura (VITI; VALERO; GUALTIERI, 2018).

Conforme já discutido, visto que simular ressaltos hidráulicos envolve um altíssimo custo computacional caso utilizadas abordagens LES e DNS, a abordagem RANS ainda se mostra muito vigente. Assim, uma grande contribuição dos trabalhos dos autores citados no parágrafo anterior foi a identificação dos modelos de turbulência utilizados nos trabalhos verificados na revisão bibliográfica. O Quadro 2.5 apresenta estes dados para as simulações baseadas na ótica euleriana para a descrição do escoamento.

Quadro 2.5 – Resumo dos modelos de turbulência utilizados nos trabalhos verificados por Viti, Valero e Gualtieri (2018).

| Autores | Ano de Publicação | Abordagem Numérica | Modelo de Turbulência | Fr₁ |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|
| Chippada et al. | 1994 | RANS | STD k-ε | 2,00 / 4,00 |
| Zhao et al. | 2004 | RANS | STD k-ε, k-l | 1,46 |
| Gonzalez e Bombardelli | 2005 | RANS | STD k-ε | 2,00 / 2,50 / 3,32 |
| Carvalho et al. | 2008 | RANS | RNG k-ε | 6,00 |
| Abbaspour et al. | 2009 | RANS | STD k-ε RNG k-ε | 4,00 / 4,70 / 5,00 / 5,70 5,80 / 6,10 / 7,00 / 7,20 / 8,00 |
| Ma et al. | 2011 | RANS | SST k-ω | 1,98 |
| Ebrahimi et al. | 2013 | RANS | STD k-ε | 3,00 / 3,30 / 3,60 / 5,00 5,70 / 6,70 / 8,00 |
| Bayon-Barrachina e Jiménez | 2015 | RANS | STD k-ε RNG k-ε SST k-ω | 6,10 |
| Witt et al. | 2015 | RANS | realizable k-ε | 2,43 / 3,65 / 4,82 |
| Bayon et al. | 2016 | RANS | RNG k-ε | 6,50 |
| Witt et al. | 2018 | RANS | realizable k-ε | 2,43 / 3,65 / 4,82 |
| Harada e Li | 2018 | RANS | k-ε k-ω | 5,80 |
| Valero et al. | 2018 | RANS | RNG k-ε k-ε | 3,12 / 3,88 / 4,20 / 6,17 6,37 / 6,47 / 8,27 / 9,52 |

Fonte: Adaptado de Viti, Valero e Gualtieri (2018).

Rodrigues (2002) realizou simulações em CFD do vertedouro e bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, estrutura que será simulada no presente estudo. Ainda, a autora comparou os resultados com o modelo físico em escala 1:100, apresentado no item 3.1.4. Foram utilizadas equações RANS como modelo matemático e o modelo $k-\varepsilon$ para a modelagem da turbulência. Ainda, a autora discute as limitações por optar por modelar a turbulência, que suprime a análise de parâmetros turbulentos do escoamento, e a ausência de um modelo de escoamento misto auxiliar para a reprodução da aeração associada ao ressalto hidráulico.

Outros dois trabalhos foram encontrados sobre estudos em CFD sobre a bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia (AMORIM; AMANTE; BARBOSA, 2015; AMORIM; RODRIGUES; MARQUES, 2004). Tal como o estudo de Rodrigues (2002) apresentado no parágrafo anterior, em ambos trabalhos foram comparados os resultados obtidos nas simulações computacionais com os resultados experimentais coletados no modelo em escala 1:100. Nestes trabalhos foi utilizado o software Flow-3D a partir de uma abordagem RANS e o método *Volume of Fluid* (VOF) para a modelagem da interface água-ar, o qual será detalhado no capítulo 3.2. Amorim, Rodrigues e Marques (2004) utilizaram o modelo $\kappa - \varepsilon$ para a modelagem da turbulência, enquanto Amorim, Amante e Barbosa utilizaram o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$.

Ainda, na literatura pode-se encontrar outros estudos que tratam sobre ressaltos hidráulicos submergidos, embora que relativos a outras estruturas hidráulicas, tal como ressaltos submergidos a jusante de comportas planas (AL-HASHIMI; SAEED; NAHI, 2019; GHADERI et al., 2021; LONG; STEFFLER; RAJARATNAM, 1991; MA; HOU; PRINOS, 2001).

Durante a revisão bibliográfica, o primeiro trabalho encontrado que trata sobre simulações computacionais de ressaltos hidráulicos submergidos, mesmo caso do estudo ora exposto, foi o publicado por Long, Steffler e Rajaratnam (1991). Os autores realizaram simulações de ressaltos hidráulicos bidimensionais a jusante de uma comporta plana, a partir de uma abordagem RANS e utilizando o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$. Neste trabalho foram simulados ressaltos para diferentes números de Froude de montante (3,19, 5,49 e 8,19) e graus de submergência (0,85, 0,63 e 0,24, dados na forma $S = (T_W - h_2)/h_2$).

Uma das grandes dificuldades na modelagem de ressaltos hidráulicos é a definição de uma condição de contorno de jusante/saída que possibilite a formação do ressalto. Bayon-Barrachina e Lopez-Jimenez (2015) discutem essa questão, entre

outras particularidades da modelagem em CFD de ressaltos hidráulicos. Os autores utilizaram como condição de contorno na saída um perfil de velocidades pré-definido ao invés de imporem uma profundidade de água fixa. A partir dessa abordagem, possibilitou-se a redução do domínio e, por consequência, redução dos custos computacionais (BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015).

Outra discussão corrente quanto a modelagem em CFD de fenômenos hidráulicos, incluindo também ressaltos hidráulicos, é quanto à utilização de softwares comerciais ou livres. Bayon et al. (2016) realizaram uma comparação entre os códigos OpenFOAM, de código livre, e FLOW-3D, comercial, para um ressalto hidráulico de baixo número de Reynolds ($Re_1 = 3.10^4$), comparando os resultados obtidos nas simulações computacional com dados de um modelo físico hidráulico. Os autores concluíram que o FLOW-3D parece reproduzir melhor a interação entre os escoamentos supercrítico e subcrítico, tal como como a razão entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico. No entanto, o OpenFOAM reproduz melhor o estrutura do salto hidráulico (BAYON et al., 2016).

Um trabalho recente foi verificado onde utilizou-se uma abordagem LES para modelar um ressalto hidráulico com $Fr_1 = 2$ (MUKHA; ALMELAND; BENSOW, 2022). Os autores divulgaram uma bateria de resultados de simulações realizadas a partir do código OpenFOAM a fim de avaliar a influência dos parâmetros da modelagem na acurácia da simulação, além de divulgar boas práticas para a modelagem computacional a partir da abordagem LES. Ainda, os autores compararam os resultados das simulações com os resultados obtidos em DNS para a mesma situação (MORTAZAVI et al., 2016), cujo trabalho será detalho no parágrafo seguinte.

Um único trabalho de simulação em CFD de ressaltos hidráulicos foi verificado utilizando DNS (VITI; VALERO; GUALTIERI, 2018). Mortazavi et al. (2016) realizaram uma simulação utilizando DNS para um ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 = 2$) e Reynolds ($Re_1 = 1,1.10^4$) e com um número de Weber na magnitude de 1820. O domínio simulado tinha dimensões de $20,6h \times 4,2h \times 4,2h$, onde h é a profundidade de água na condição de contorno de entrada. Ainda, foi utilizada uma malha de $1280 \times 256 \times 256$ pontos. Os autores apresentam, pela primeira vez, uma vasta gama de resultados em DNS do fenômeno de quebra de uma onda turbulenta (ressalto hidráulico). São apresentados resultados de campos de velocidade média, tensões de Reynolds, produção e dissipação de turbulência, espectros de velocidade e uma profunda investigação sobre incorporação de ar.

Simulações com alto grau de refinamento, tal como estudos em DNS, podem complementar dados obtidos experimentalmente, possibilitando um acesso não intrusivo aos processos hidrodinâmicos que ocorrem no fenômeno, bem como uma melhor análise dos fenômenos de incorporação de ar, a partir de refinadas discretizações temporais e espaciais. Contudo, existem duas grandes dificuldades na comparação precisa entre uma DNS e um experimento físico: (a) os altos custos computacionais envolvidos em uma DNS e (b) a impossibilidade de manter um número de Froude fixo e sincronizar os números de Reynolds e Weber independentemente (MORTAZAVI et al., 2016).

Embora não tratem de simulações de ressaltos hidráulicos, foram verificados três trabalhos que tratam da avaliação do efeito de escala através de uma abordagem computacional (TASSINARI, 2022; TASSINARI et al., 2018; TORRES et al., 2018).

Tassinari et al. (2018) e Tassinari (2022), apresentaram trabalhos que tratam da avaliação do efeito de escala sobre vertedouros em degraus através de uma abordagem computacional utilizando fluidos hipotéticos, tal como objetiva a presente dissertação, para estruturas em escala 1:1, 1:10 e 1:100.

O trabalho de Torres et al. (2018) apresentou resultados de simulações de um vertedor labirinto realizadas nos softwares Ansys Fluent e OpenFOAM. Em um primeiro momento os autores buscaram validar os resultados das simulações com resultados experimentais de um modelo físico em escala 1:25. Após, foram realizadas simulações em escala de protótipo para a avaliação do efeito de escala.

3 SÍNTESE DO TRABALHO REALIZADO

Embora a presente dissertação esteja organizada em dois artigos principais, é apresentado neste capítulo uma síntese do trabalho realizado, a fim de abranger o processo que culminou na elaboração das publicações, bem como apresentar detalhes que possam ser suprimidos dos dois artigos principais. Assim, este capítulo é dividido em dois itens, a saber: item 3.1, onde são descritas as estruturas físicas do protótipo e dos modelos físicos hidráulicos, os quais foram instrumentados e de onde foram coletados os dados utilizados para a comparação com as simulações computacionais e; item 3.2, onde é descrito o código utilizado nas simulações computacionais, bem como as principais estratégias numéricas utilizadas nas simulações.

3.1 DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS FÍSICAS

Antes de tratar sobre as estratégias computacionais e as características das simulações realizadas, tema da presente dissertação, serão apresentados os modelos físicos onde foram coletados os dados experimentais que possibilitaram a validação e comparação com os resultados obtidos computacionalmente.

No presente item, serão apresentadas as estruturas que foram modeladas computacionalmente, sendo elas: protótipo (escala 1:1), modelos físicos em escala 1:32, 1:50 e 1:100. Ainda, serão apresentadas particularidades de cada uma das estruturas, como instrumentação, local de construção, ano de aquisição de dados, entre outras características. As informações deste item foram retiradas dos trabalhos de Teixeira (2008), Wiest (2008), Carvalho (2010) e Teixeira et al. (2012). Os dados apresentados por Teixeira (2008) e Teixeira et al. (2012) serão base para a comparação com os dados numéricos obtidos nas simulações computacionais.

O Quadro 3.1 apresenta um resumo das características geométricas do protótipo e dos modelos em escala 1:32, 1:50 e 1:100.

Quadro 3.1 – Resumo comparativo das características geométricas do protótipo e dos modelos da UHE Porto Colômbia.

| Características Geométricas | Protótipo (1:1) | Modelo Físico | | |
|--|-----------------|-----------------|---------------|-------|
| | | 1:32 | 1:50 | 1:100 |
| Altura da crista do vertedouro (m) | 18,00 | 0,563 | 0,360 | 0,180 |
| Número de vãos | 9 | 1 + 2*0,5 | 1 + 2*0,933 | 9 |
| Largura dos vãos (m) | 15,00 | 0,468 + 2*0,234 | 0,3 + 2*0,280 | 0,150 |
| Raio de concordância entre a calha e a bacia de dissipação (m) | 12,50 | 0,391 | 0,250 | 0,125 |
| Largura da bacia de dissipação (m) | 163,00 | 1,150 | 1,000 | 1,63 |
| Comprimento da bacia de dissipação (m) | 45,80 | 1,431 | 0,916 | 0,458 |
| Altura da soleira terminal (m) | 2,85 | 0,089 | 0,057 | 0,028 |

Fonte: Adaptado de Teixeira (2008).

3.1.1 Protótipo – Escala 1:1

A UHE Porto Colômbia localiza-se no rio Grande, inserida na bacia hidrográfica do Rio Paraná, na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Sua casa de força possui quatro unidades geradoras, que totalizam uma potência de 320 MW. Ainda, a UHE é propriedade da concessionária Furnas Centrais Elétricas S.A. e teve sua operação iniciada em 1973 (CARVALHO, 2010).

A barragem da UHE possui um comprimento total de cerca de 1960 m e é composta pelas seguintes estruturas: tomada d'água, transições, vertedouro e maciços de terra (CARVALHO, 2010). A Figura 3.1 apresenta uma representação da barragem da UHE Porto Colômbia, com destaque para seu vertedouro em sua porção central.

Figura 3.1 – Vista aérea da barragem da UHE Porto Colômbia.



Fonte: Carvalho (2010).

O objeto de investigação do presente estudo é restritivamente o vertedouro da UHE Porto Colômbia. Esse vertedouro é composto por nove vãos de 15 m cada, com soleiras controladas por comportas segmento, seguido por uma calha rápida e finalizado por uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Ainda, o mesmo possuía, originalmente, uma capacidade total de 16.000 m³/s, com uma vazão específica de 98 m³/(s.m) (CARVALHO, 2010).

Originalmente, a bacia de dissipação do vertedouro era do Tipo II do USBR. Entretanto, a mesma passou por modificações em sua geometria devido a manifestações patológicas oriundas de processos de cavitação, que danificou nas faces laterais dos 36 blocos de queda localizados na entrada da bacia de dissipação. Ainda, na laje imediatamente a jusante dos blocos foram observadas crateras de erosão com dimensões médias de 2,00 m de comprimento, 1,65 m de largura e 0,70 m de profundidade. Nos pontos de erosão citados observou-se também exposição e arrancamento de armaduras, além do cobrimento de concreto (CARVALHO, 2010).

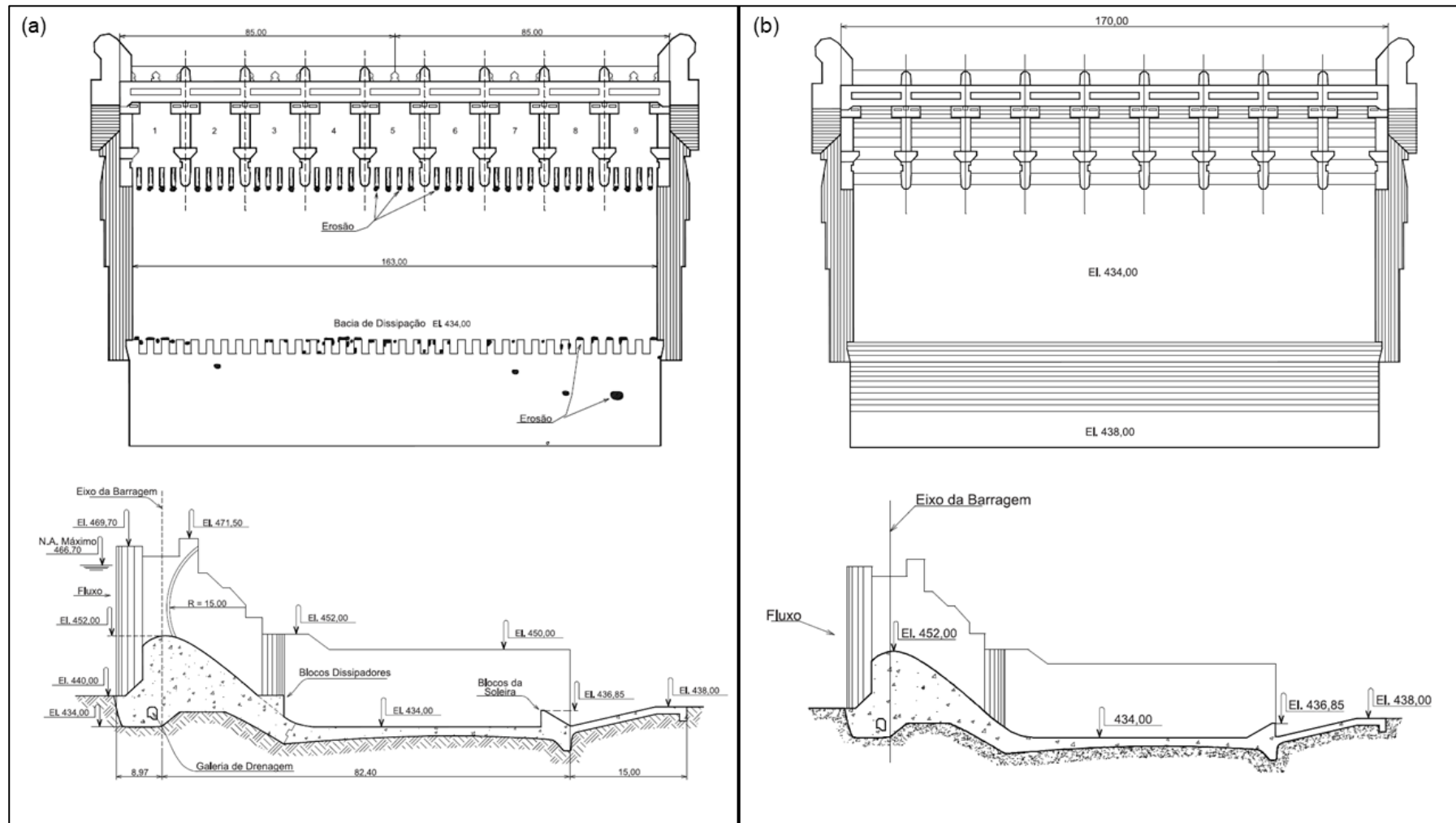
Carvalho (2010), relata detalhadamente os problemas ocorridos e as soluções adotadas para a recuperação desta bacia de dissipação. Ainda, o autor descreve, de maneira sucinta, a instrumentação instalada para o monitoramento de pressões no fundo da bacia de dissipação.

Em outubro de 1983, através de uma inspeção subaquática, foram inicialmente verificadas as anomalias e em outubro de 1990, em uma nova inspeção subaquática, foi verificado o agravamento das mesmas, iniciando uma série de estudos para o solucionamento do problema. As obras de reparo e modificação foram realizadas entre os meses de março e dezembro de 1994 (CARVALHO, 2010).

Em síntese, as modificações realizadas foram a remoção dos blocos de queda na entrada da bacia de dissipação e alterações na geometria da soleira terminal. No projeto original, a bacia de dissipação foi dimensionada, com boa performance, para uma vazão de 12.000 m³/s, o que corresponde a três quartos da vazão de projeto do vertedouro. Em sua nova geometria, para o mesmo comportamento hidráulico, a vazão de projeto da bacia de dissipação foi metade da vazão de projeto do vertedouro, ou seja, 8.000 m³/s. O valor foi considerado adequado visto que a UHE Porto Colômbia está sob efeito regularizador de outros cinco grandes reservatórios de UHEs situadas a montante. Ainda, ressalta-se que a maior vazão vertida em quase 30 anos de operação da usina - datados com base na publicação de Carvalho (2010) - foi de 5.700 m³/s (CARVALHO, 2010).

A Figura 3.2 apresenta a bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia antes e após as modificações realizadas.

Figura 3.2 – (a) Bacia de dissipação antes das modificações, apresentando o mapeamento de manifestações patológicas. (b) Bacia de dissipação após as modificações.



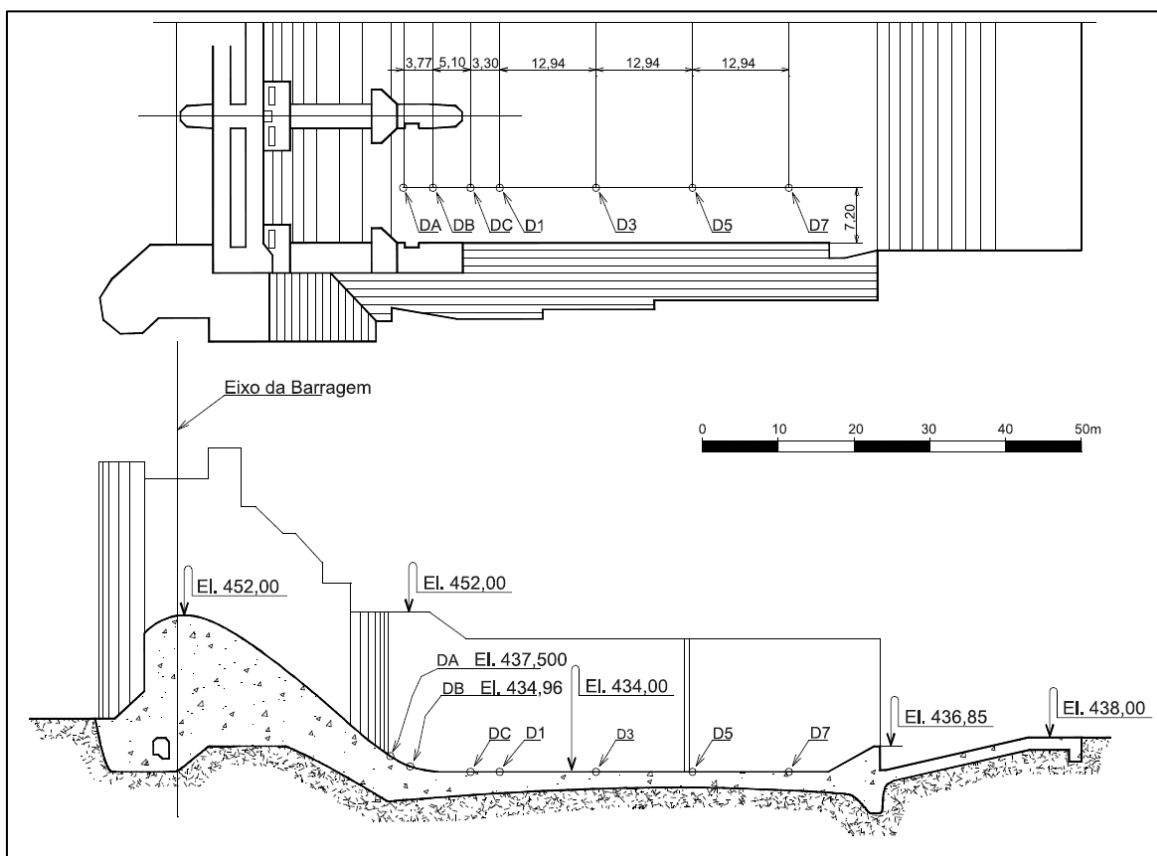
Fonte: Adaptado de Carvalho (2010).

Ressalta-se que a geometria utilizada como base para as simulações computacionais é referente à conformação da bacia de dissipação após as modificações supracitadas.

As campanhas experimentais para a coleta de dados de pressão no fundo da bacia de dissipação do protótipo foram realizadas em maio de 1996, para descargas de 500, 1.000, 2.000, 3.000 e 4.000 m³/s. Foram coletadas amostras de pressões instantâneas em sete pontos com uma taxa de aquisição de dados de 100 Hz, durante um período variável entre 20 e 45 minutos. Ainda, os sensores possuíam uma faixa de medição de 0 a 50 mca, com uma incerteza na ordem de 0,25% (CARVALHO, 2010; TEIXEIRA, 2008).

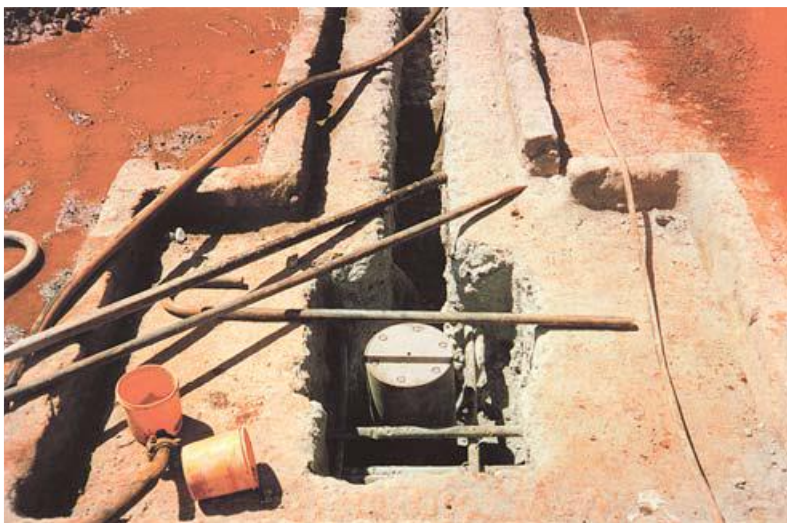
Os transdutores de pressão foram instalados junto ao fundo da bacia de dissipação, no centro do vão extremo direito do vertedouro, visualizando no sentido do escoamento. A Figura 3.3 apresenta a localização dos transdutores de pressão na bacia de dissipação e a Figura 3.4 apresenta um dos transdutores durante a instalação.

Figura 3.3 – Localização dos transdutores de pressão no protótipo.



Fonte: Carvalho (2010).

Figura 3.4 – Transdutor de pressão durante a instalação.



Fonte: Carvalho (2010).

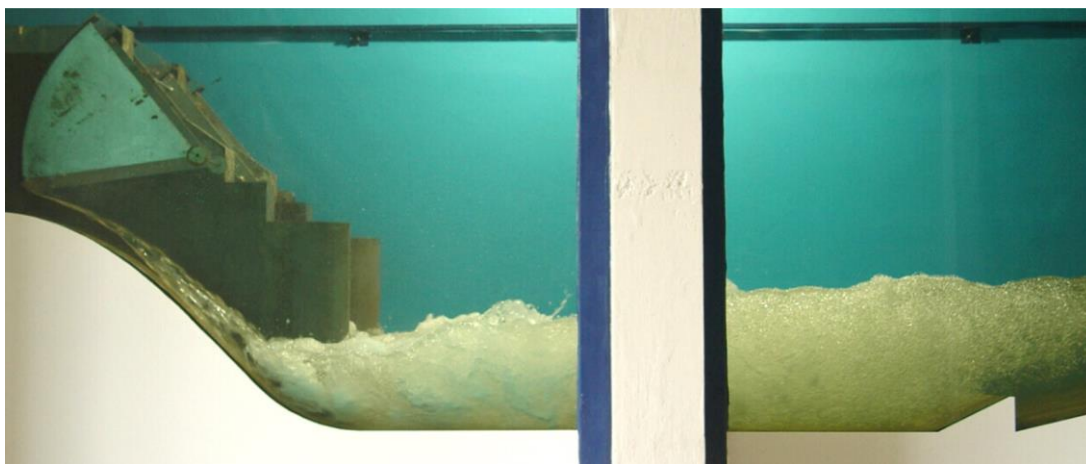
3.1.2 Modelo em Escala 1:32

O modelo físico em escala 1:32 foi construído em 2007, no Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) da concessionária Furnas Centrais Elétricas S.A. Trata-se de um modelo seccional com dois vãos representados, sendo um deles centralizado, onde foram realizadas as medições de pressão, e o outro particionado nas laterais do vão central.

As amostras de pressão foram coletadas em 12 pontos distintos com frequências de 100 e 500 Hz, durante períodos de 15 minutos. Todavia, para igualar as posições de coleta de dados em escala de modelo com as posições de medição realizadas no protótipo, as análises realizadas por Teixeira (2008) levaram em conta apenas dados de 7 dos 12 sensores. A faixa de medição dos transdutores era de -0,5 a 1,0 mca., apresentando um erro relativo de 0,1%, equivalente a $\pm 0,048$ mca, em escala de protótipo.

Os ensaios contemplaram as seguintes vazões equivalentes em protótipo: 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 6.000 e 8.000 m^3/s , com diferentes graus de submergência. Entretanto, apenas as vazões 1.000, 2.000, 3.000 e 4.000 m^3/s foram utilizadas nas análises de Teixeira (2008), pelos mesmos motivos citados no parágrafo anterior. A Figura 3.5 apresenta o modelo físico executado no LAHE, em um ensaio com vazão de 4.000 m^3/s , equivalente em protótipo.

Figura 3.5 – Ensaio realizado no modelo físico em escala 1:32, com vazão equivalente de protótipo de 4.000 m³/s.



Fonte: Teixeira (2008).

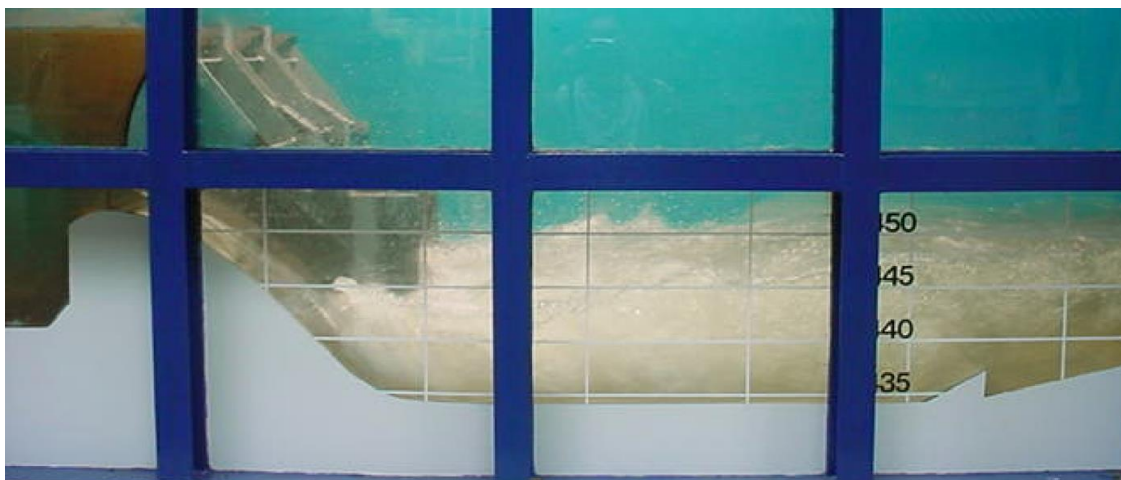
3.1.3 Modelo em Escala 1:50

O modelo físico em escala 1:50 foi construído em 1987 no LAHE, com finalidade de estudar os agentes causadores das manifestações patológicas verificadas em 1983 durante vistoria subaquática, apresentadas no item 3.1.1 do presente documento. No modelo são representados três vãos, onde as medições foram realizadas no vão central.

Foram coletadas séries de pressão em 10 pontos distintos, com taxas de aquisição de dados de 100 e 500 Hz, durante períodos de 15 minutos. Assim como no modelo em escala 1:32, apenas 7 dos 10 pontos foram avaliados por Teixeira (2008). Os transdutores apresentavam faixa de aquisição no intervalo -0,50 a 1,0 mca, com um erro relativo de 0,1 %, equivalente a $\pm 0,075$ mca, em escala de protótipo. Foram ensaiadas as mesmas vazões, levando em consideração a escala de Froude, que as ensaiadas no modelo em escala 1:32 e a análise de Teixeira (2008) contemplou, também, as mesmas análises realizadas para o modelo em escala 1:32.

Wiest (2008) realizou um trabalho relativo à avaliação do campo de pressões observado no modelo físico em escala 1:50. Assim, maiores detalhes, bem como outras ilustrações, sobre o modelo podem ser encontrados no trabalho do referido autor. A Figura 3.6 apresenta um ensaio com vazão de 4.000 m³/s, com equivalência de protótipo, no modelo em escala 1:50.

Figura 3.6 – Ensaio realizado no modelo físico em escala 1:50, com vazão equivalente de protótipo de 4.000 m³/s.



Fonte: Teixeira (2008).

3.1.4 Modelo em Escala 1:100

O modelo físico em escala 1:100 foi executado, também, no LAHE, no ano de 1992. Todavia, o mesmo foi construído com o objetivo, principalmente, de estudar as modificações a serem realizadas na bacia de dissipação, apresentadas no item 3.1.1 do presente documento. Inicialmente a estrutura possuía características de um modelo de conjunto, levando em consideração as características tridimensionais do escoamento. Mas, com o intuito de compatibilizar a comparação entre os modelos, o mesmo foi adaptado para uma estrutura bidimensional.

Tal como nos modelos em escala 1:32 e 1:50, o modelo em escala 1:100 foi instrumentado com transdutores de pressão, coletando amostras em taxas de 100 e 500 Hz, durante períodos de 15 minutos. Como no modelo em escala 1:50, as amostras foram coletadas em 10 diferentes pontos, sendo apenas 7 deles utilizados na análise de Teixeira (2008). Os transdutores apresentavam faixa de aquisição no intervalo -0,50 a 1,0 mca, com um erro relativo de 0,1 %, equivalente a $\pm 0,15$ mca, em escala de protótipo.

Da mesma forma que a análise de pressões, também se comportou a análise das vazões. Foram ensaiadas vazões de 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 6.000 e 8.000 m³/s, com diferentes graus de submergência. Entretanto, apenas as vazões 1.000, 2.000, 3.000 e 4.000 m³/s foram utilizadas nas análises de Teixeira (2008). A Figura

3.7 apresenta um ensaio com vazão de 4.000 m³/s, com equivalência de protótipo, no modelo em escala 1:100.

Figura 3.7 – Ensaio realizado no modelo físico em escala 1:100, com vazão equivalente de protótipo de 4.000 m³/s.



Fonte: Teixeira (2008).

3.1.5 Variáveis Medidas e Calculadas

Os dados coletados nas estruturas físicas integraram parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) denominado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, realizado como uma parceria entre Furnas Centrais Hidrelétricas S.A. e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Um ponto inicial do trabalho realizado nessa dissertação foi resgatar os dados medidos em cada uma das estruturas físicas apresentadas por Teixeira (2008). Após, foi necessário entender como estes dados foram medidos e buscar quais outras variáveis foram calculadas a partir dos dados medidos, bem como entender o processo de cálculo dessas variáveis.

Teixeira (2008) e Teixeira et al (2012) apresentaram os dados de pressão média e posições do ressalto hidráulico adimensionalizados tal como proposto por Marques, Almeida e Endres (1999). As adimensionalizações citadas são apresentadas conforme as equações 3.1 e 3.2.

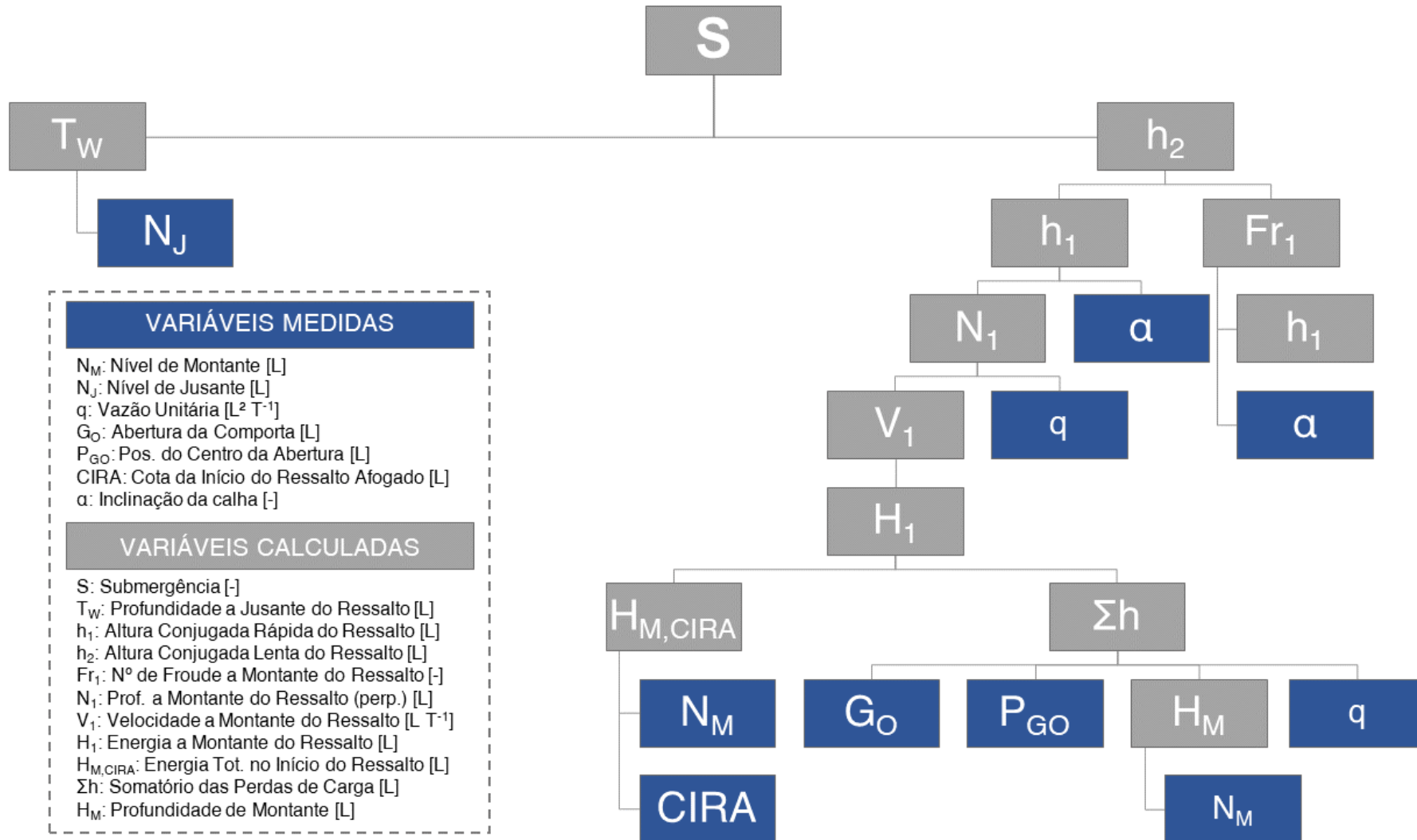
$$\psi = \left(\frac{P_x - h_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(\frac{1}{S} \right) \quad (3.1)$$

$$\Gamma = \frac{X}{h_2 - h_1} \quad (3.2)$$

Onde Ψ é a pressão média adimensionalizada; P_x é a pressão média na posição X , em mca; h_1 e h_2 são as alturas conjugadas do ressalto hidráulico, em m; S é o grau de submergência, conforme apresentado na equação 2.6; Γ é a posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto e X é a posição do início do ressalto hidráulico, em m.

O processo de investigação dos dados partiu da necessidade de “desadimensionalizar” algumas variáveis apresentadas por Teixeira (2008), a fim de obter os dados brutos, otimizando a comparação com os resultados obtidos em simulação. Assim, a partir de planilhas de cálculo resgatadas do trabalho de Teixeira (2008), bem como de outros arquivos relacionados ao projeto de P&D supracitado. A Figura 3.8, na sequência, apresenta um diagrama de árvore que relaciona as variáveis medidas e calculadas, tomando como base o grau de submergência (S).

Figura 3.8 – Variáveis medidas e calculadas por Teixeira (2008).



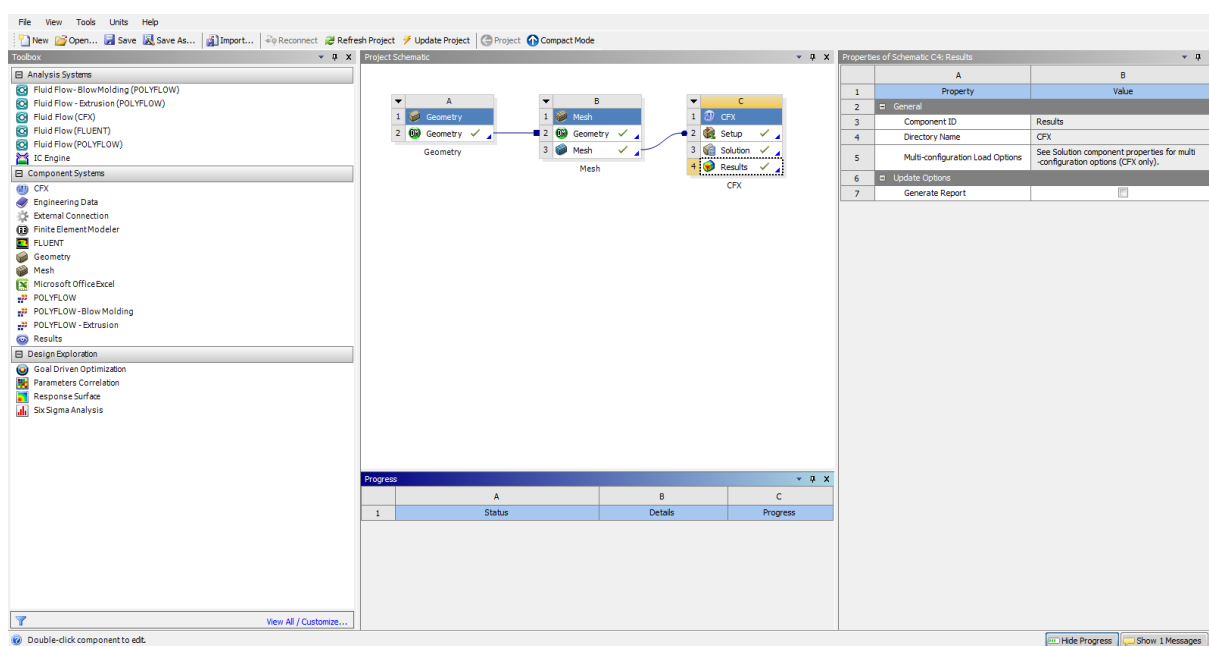
Nota-se, portanto, que parte das variáveis utilizadas na adimensionalização das pressões médias e das posições foram calculadas a partir da vazão utilizada no ensaio (q) e de medidas e posições geométricas (N_M , N_J , $CIRA$, α , G_o e P_{G_o}).

3.2 CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional do ressalto hidráulico foi realizada no software Ansys CFX (ANSYS, 2009). A escolha foi dada devido à expertise e familiaridade de usuários próximos, colegas do grupo de pesquisa do qual o autor participa, com o software. Ainda, o software possui facilidades na geração de geometrias e malhas, além da facilidade na visualização e na coleta dos resultados.

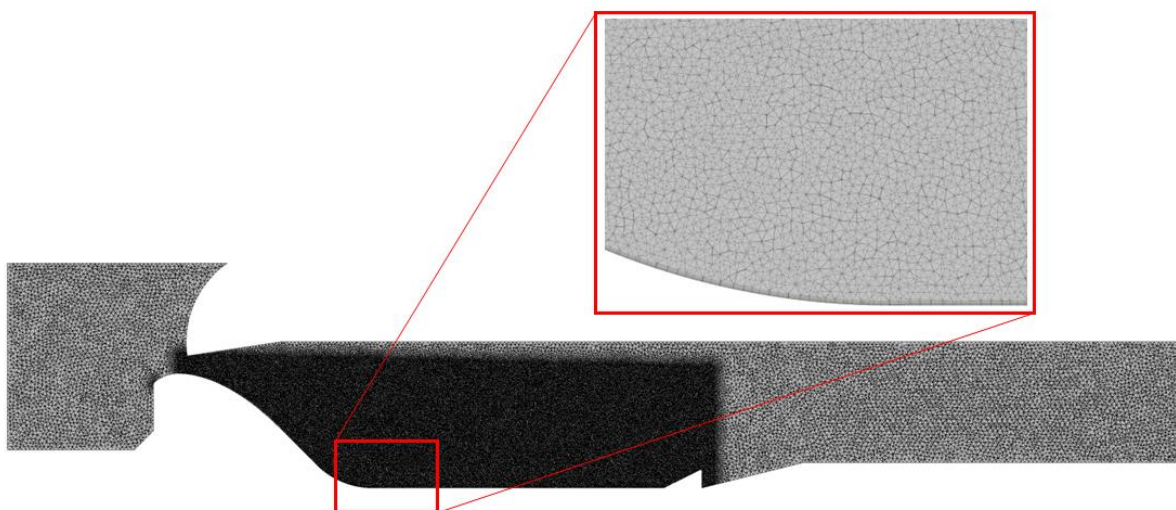
O Ansys CFX é integrado à plataforma Ansys Workbench, que é um ambiente de desenvolvimento que permite integrar várias etapas de projeto do modelo computacional requerido. O Ansys Workbench facilita a integração de outros softwares e ferramentas da Ansys Inc., tal como o Design Modeler, utilizado para modelar as geometrias que serão utilizadas em sua simulação e o Meshing, utilizado para a geração das malhas a serem utilizadas na simulação. A Figura 3.9 apresenta o layout do Ansys Workbench, onde pode-se visualizar o fluxo de trabalho utilizado nas simulações.

Figura 3.9 – Layout do Ansys Workbench.



A malha foi gerada na ferramenta Ansys Meshing. Foi utilizada uma malha prismática piramidal triangular, com um esquema de inflação de malha a partir da calha do vertedouro, a fim de melhorar a representação da camada limite. Ainda, foi utilizado um refinamento de malha na região de interesse, ou seja, na região de ocorrência do ressalto hidráulico na bacia de dissipação. Foram utilizados elementos na região refinada com dimensões características de 0,16 m, em escala de protótipo, e adaptados através da escala geométrica conforme a simulação desejada. A dimensão característica da malha possui a mesma ordem de grandeza do erro do transdutor de pressão em escala de protótipo, fato que definiu-a para o prosseguimento para a etapa de validação de malha. A Figura 3.10 apresenta a malha utilizada nas simulações.

Figura 3.10 – Exemplo de malha utilizada nas simulações.



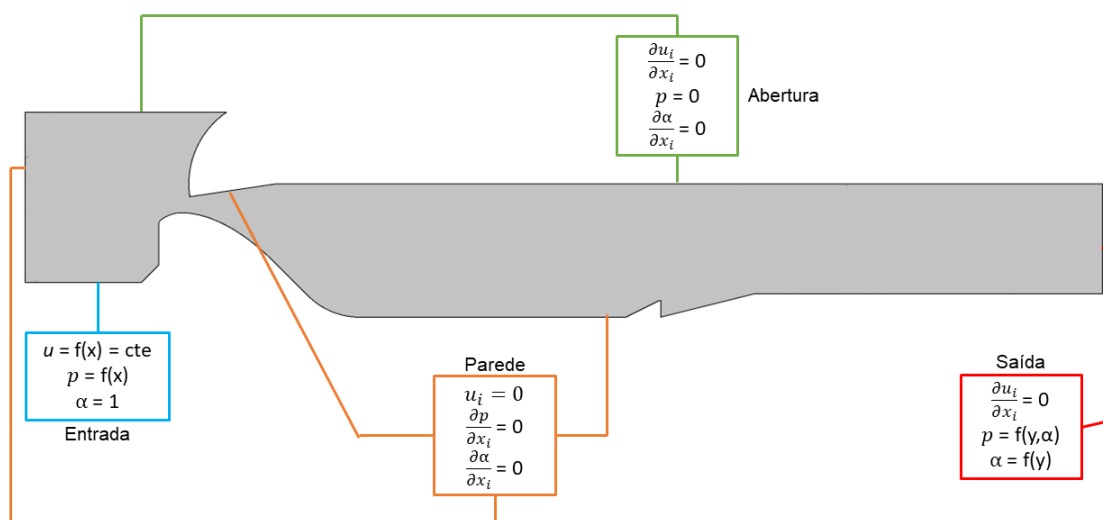
A definição e validação das malhas foram realizadas através do cálculo do Índice de Convergência de Malha (GCI, do inglês *Grid Convergence Index*). Primeiramente proposto por Roache (1997) e também apresentado por Celik et al. (2008), o GCI é um método que avalia a incerteza numérica ao adotar uma malha com certa discretização, comparando os resultados de variáveis obtidos na simulação desta com resultados obtidos em simulações utilizando outra ou mais malhas de discretização diferentes. Celik et al. (2008) sistematizaram o cálculo do GCI em cinco passos e maiores informações sobre a metodologia podem ser encontrados em seu trabalho. O GCI foi calculado tomando como base as pressões médias nos pontos de interesse no fundo da calha e obteve-se GCIs médios entre 2,78% e 5,47% para todas as escalas. Portanto, conforme a metodologia apresentada, pode-se afirmar que erros

nos resultados de pressão média iguais ou menores que a faixa supracitada estão sujeitos à incerteza da malha adotada.

Foram realizadas simulações tridimensionais em regime permanente a partir do método dos volumes finitos. As equações resolvidas numericamente são as equações médias da continuidade (equação 2.17) e da conservação da quantidade de movimento (equação 2.18), também conhecidas como equações RANS, conforme apresentado na revisão bibliográfica da presente dissertação. A formulação apresentada no manual teórico do solver utilizado (ANSYS, 2009) também apresenta um termo de forças de campo na equação 2.18, além de trabalhar com o conceito de viscosidade efetiva (μ_{eff}), a qual é representada pelo somatório da viscosidade molecular (μ) e da viscosidade turbulenta (μ_t).

Como condições de contorno, foi utilizada uma condição de entrada de massa, a montante, correspondente a uma vazão de água de 4.000 m³/s (em escala de protótipo); uma condição de saída, com nível d'água constante com pressão hidrostática; condições de parede (*no-slip*) onde não ocorre trocas de massa; condições de simetria nas partes laterais do domínio e; condições de abertura na parte superior. A Figura 3.11 apresente uma representação do domínio simulado e das condições de contorno utilizadas.

Figura 3.11 – Domínio das simulações e condições de contorno.



Para modelagem da interface água-ar, foi utilizado o método Volume de Fluido (VOF, do inglês *Volume of Fluid*), descrito por Hirt e Nichols (1981), através de um modelo multifásico homogêneo (ANSYS, 2009). Ressalta-se que o método já se encontra implementado no solver Ansys CFX. No método VOF, a interface entre os

fluidos - água-ar, no presente estudo - é definida através de uma função marcadora, onde a transição entre um fluido e outro ocorre de forma descontínua. Define-se uma variável (α) que representa a parcela de preenchimento da célula de cálculo com um dos dois fluidos envolvidos. Assim, $0 \leq \alpha \leq 1$ onde, quanto mais próximo o valor de α da unidade, a célula está preenchida com o fluido de referência e, analogamente, quanto mais próxima de zero, está preenchida com o fluido secundário (ANSYS, 2009; MONTEIRO, 2018).

A variável α também pode ser denominada fração de volume, ou fração água-ar, no caso do presente estudo. Assim, um volume V_α , ocupado pela fase α em um volume V_T em um elemento com fração de volume r_α , pode ser definido pela equação 3.3.

$$V_\alpha = r_\alpha V_T \quad (3.3)$$

Nesse contexto, é importante definir os termos densidade material, densidade efetiva e densidade de mistura. A densidade material (ρ_α) é a densidade do fluido em sua integralidade, quando apenas uma fase é presente. Já a densidade efetiva ($\tilde{\rho}_\alpha$) é dada pelo produto da densidade material pela fração de volume. Por fim, a densidade de mistura (ρ_m), no modelo homogêneo, é dada pelo somatório parcial das densidades efetivas. As equações 3.4 e 3.5 apresentam as relações supracitadas.

$$\tilde{\rho}_\alpha = r_\alpha \rho_\alpha \quad (3.4)$$

$$\rho_m = \sum_\alpha \tilde{\rho}_\alpha \quad (3.5)$$

As trocas envolvidas na interface são calculadas a partir de uma equação de advecção (MONTEIRO, 2018), representada pela equação 3.6.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (3.6)$$

O modelo de turbulência utilizado foi o RNG $\kappa - \varepsilon$, proposto por Yakhot et al. (1992). Este modelo de turbulência é uma derivação do modelo $\kappa - \varepsilon$ baseada na teoria de grupo de renormalização, de onde deriva-se sua alcunha (RNG, do inglês *Renormalization-Group*). O modelo utiliza-se de modelos estatísticos para a derivação das equações médias das quantidades turbulentas de energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. O modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ depende menos de constantes

empíricas quando comparado ao modelo $\kappa - \varepsilon$ tradicional (AMORIM; AMANTE; BARBOSA, 2015).

O modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$ é um modelo de duas equações, onde a primeira (equação 3.7) trata da energia cinética turbulenta (κ) e a segunda (equação 3.8) determina a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ε).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - G_B - \rho \varepsilon + S_k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_B) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.8)$$

Onde G_k refere-se à geração de energia cinética turbulenta causada pelo gradiente médio de velocidade; G_B refere-se à geração de energia cinética turbulenta causada pela flutuabilidade e; S_k e S_ε são os termos de fonte.

As relações para R_ε e μ_t , onde o segundo é dado no termo de viscosidade efetiva (μ_{eff}), são dados pelas equações 3.9 e 3.10.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{k(1 + \beta \eta^3)} \quad (3.9)$$

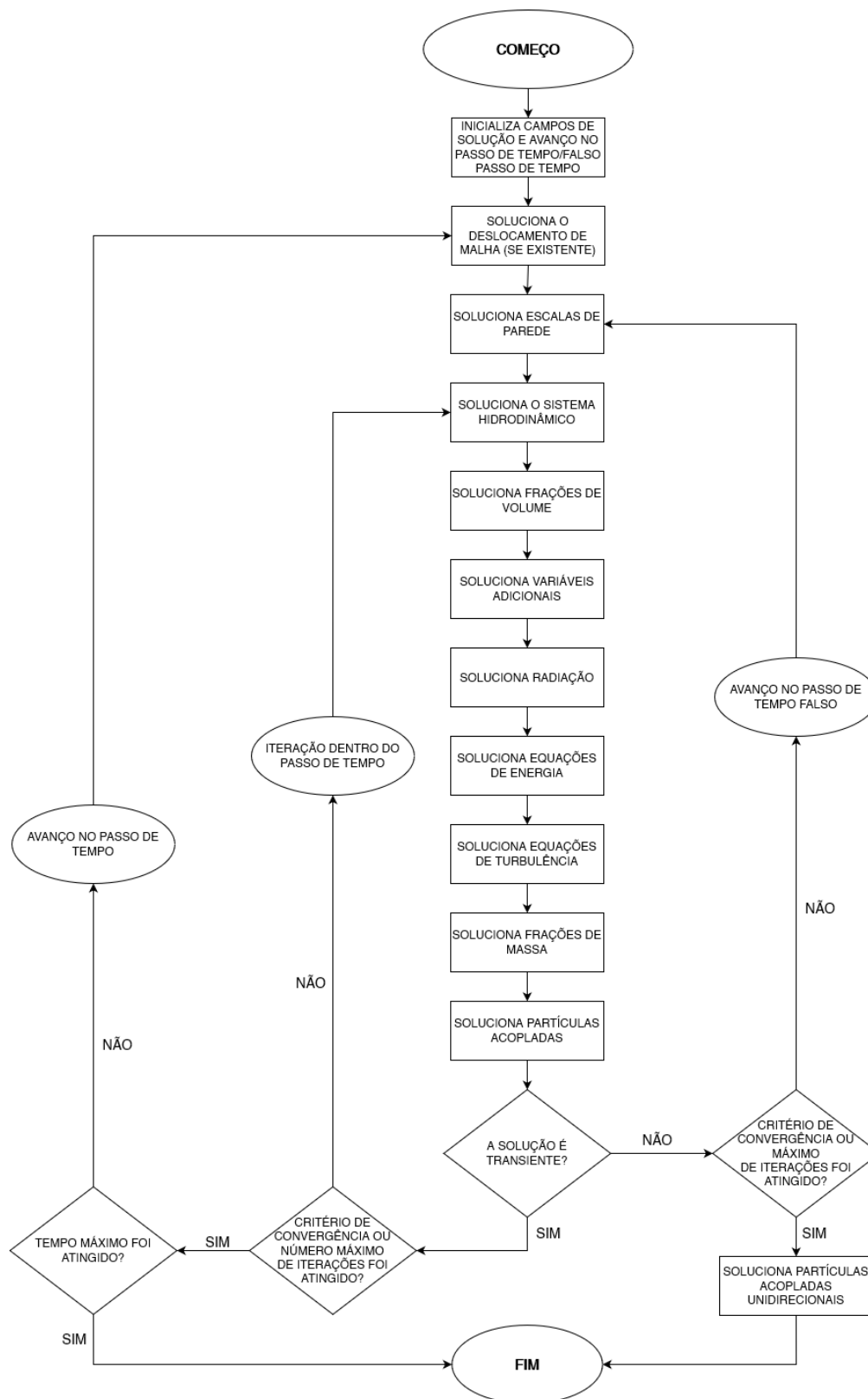
$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

As constantes para o modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$ são dadas por:

$C_\mu = 0,0845$; $C_{1\varepsilon} = 1,42$; $C_{2\varepsilon} = 1,68$; $C_{3\varepsilon} = 1,0$; $\sigma_k = 0,7194$; $\sigma_\varepsilon = 0,7194$; $\eta_0 = 4,38$ e; $\beta = 0,012$.

Por fim, pode-se realizar um fluxograma resumo exemplificando como o solver Ansys CFX realiza suas soluções, conforme apresentado na Figura 3.12. Embora as soluções realizadas no presente trabalho foram de regime permanente, a qual utiliza um falso passo de tempo para a convergência de sua solução, também é apresentada na Figura 3.12 a maneira que o Ansys CFX realiza suas transições transientes. Caso utilizadas soluções de regime não-permanente, seria possibilitada a análise da variabilidade temporal das variáveis envolvidas nas simulações. Todavia, como o objetivo do presente trabalho refere-se à avaliação de parâmetros médios do escoamento, julgou-se que a solução em regime permanente se demonstra adequada para cumprir os objetivos propostos.

Figura 3.12 – Fluxograma resumo de solução do Ansys CFX.



Fonte: adaptado de Ansys (2009).

3.3 AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES EM CFD COM FLUÍDOS HIPOTÉTICOS

A proposta central da presente dissertação, conforme apresentado no objetivo geral, é avaliar o efeito de escala nas pressões médias em uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, através de simulações em CFD com fluidos hipotéticos. A adoção desses fluidos visa garantir a preservação, também, dos critérios de semelhança de Reynolds e Weber além do critério de Froude, respectivamente.

Assim, pode-se conceituar um fluido hipotético, no contexto apresentado, como um fluido que possui suas propriedades físicas (massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial fluido-ar, no escopo do presente estudo) alteradas a fim de garantir outros critérios de semelhança entre modelos e protótipo, além do critério de semelhança de Froude, usualmente já atendido. No caso de modelos físicos hidráulicos define-se como fluido hipotético o fluido principal envolvido no escoamento, ou seja, o fluido em fase líquida.

Para a definição dos fluidos hipotéticos, na presente pesquisa foram alteradas as propriedades de viscosidade cinemática e tensão superficial fluido-ar do fluido principal nas simulações, concomitante ou alternadamente. Assim, foi possível a garantia dos critérios de semelhança de Reynolds e Weber, também, concomitante ou alternadamente. Ressalta-se que a massa específica do fluido foi mantida constante, assim, o critério de semelhança de Euler é automaticamente atendido, juntamente com o critério de semelhança de Froude.

Portanto, o seguinte procedimento foi utilizado para a definição das viscosidades cinemáticas dos fluidos hipotéticos: a partir da equação 2.9, tendo em vista que para o atendimento do critério de semelhança de Reynolds a igualdade $Re_M = Re_P$ deve ser satisfeita e que a escala de velocidades é dada pelo critério de semelhança de Froude ($\lambda_V = (V_M/V_P) = \lambda_L^{1/2}$), pode-se obter a escala de viscosidades cinemáticas (λ_ν) em função da escala geométrica, como apresentado na equação 3.11.

$$\lambda_\nu = \frac{\nu_M}{\nu_P} = \lambda_L^{3/2} \quad (3.11)$$

Um processo análogo pode ser desenvolvido para a determinação da escala de tensões superficiais fluido-ar (λ_σ) em função do critério de semelhança de Weber

($We_M = We_P$), baseado na equação 2.10, em função da escala geométrica. A equação 3.12 apresenta esse desenvolvimento.

$$\lambda_\sigma = \frac{\sigma_M}{\sigma_P} = \lambda_L^2 \quad (3.12)$$

Dessa forma, pode-se definir as viscosidades cinemáticas e tensões superficiais fluido-ar para os fluidos hipotéticos em função da escala geométrica. Sendo conhecidas as magnitudes de viscosidade cinemática e tensão superficial dos fluidos envolvidos no protótipo, pode-se calcular, com o auxílio das equações 3.11 e 3.12, as magnitudes destas propriedades físicas para os fluidos hipotéticos em escala de modelo. O Quadro 3.2 apresenta essas propriedades para cada um dos fluidos a serem utilizados. Todas as simulações bifásicas realizadas ocorreram entre as fases fluido e ar. Ressalta-se que foram consideradas as propriedades dos fluidos a uma temperatura de 25°C, configuração padrão no Ansys, o que resulta na massa específica adotada para o fluido principal de 997 kg/m³ e para o ar de 1,225 kg/m³. Ainda, os fluidos foram indexados de forma a identificar a escala geométrica que eles estão representando e os critérios de semelhança que eles estão respeitando.

Quadro 3.2 – Características físicas dos fluidos a serem simulados.

| ÍNDICE DO FLUIDO | A/H | ESCALA | CRIT. DE SEMELHANÇA ATENDIDOS | VISCOSIDADE CINEMÁTICA [m ² /s] | TENSÃO SUPERF. FLUIDO-AR [N/m] |
|------------------|-----|--------|-------------------------------|--|--------------------------------|
| 1_F | A | 1:1 | - | 8,90x10 ⁻⁷ | 7,23x10 ⁻² |
| 32_F | A | 1:32 | Fr | 8,90x10 ⁻⁷ | 7,23x10 ⁻² |
| 32_FR | H | 1:32 | Fr / Re | 4,92x10 ⁻⁹ | 7,23x10 ⁻² |
| 32_FW | H | 1:32 | Fr / We | 8,90x10 ⁻⁷ | 7,06x10 ⁻⁵ |
| 32_FRW | H | 1:32 | Fr / Re / We | 4,92x10 ⁻⁹ | 7,06x10 ⁻⁵ |
| 50_F | A | 1:50 | Fr | 8,90x10 ⁻⁷ | 7,23x10 ⁻² |
| 50_FR | H | 1:50 | Fr / Re | 2,52x10 ⁻⁹ | 7,23x10 ⁻² |
| 50_FW | H | 1:50 | Fr / We | 8,90x10 ⁻⁷ | 2,89x10 ⁻⁵ |
| 50_FRW | H | 1:50 | Fr / Re / We | 2,52x10 ⁻⁹ | 2,89x10 ⁻⁵ |
| 100_F | A | 1:100 | Fr | 8,90x10 ⁻⁷ | 7,23x10 ⁻² |
| 100_FR | H | 1:100 | Fr / Re | 8,90x10 ⁻¹⁰ | 7,23x10 ⁻² |
| 100_FW | H | 1:100 | Fr / We | 8,90x10 ⁻⁷ | 7,23x10 ⁻⁶ |
| 100_FRW | H | 1:100 | Fr / Re / We | 8,90x10 ⁻¹⁰ | 7,23x10 ⁻⁶ |

Na coluna "ÍNDICE DO FLUIDO": F = Froude; R = Reynolds; W = Weber.

A/H: caracterização do fluido como água (A) ou hipotético (H).

O Ansys CFX permite que se façam modificações nas propriedades dos fluidos, o que permite a configuração dos fluidos hipotéticos propostos. Os dados obtidos nas simulações com fluidos com e sem modificação de suas propriedades foram

comparados com os resultados de Teixeira (2008) e de Teixeira et al. (2012), onde foi realizada uma avaliação do efeito de escala a partir dos dados de modelos físicos e protótipo para a mesma estrutura ora em análise. A ideia central desse subcapítulo será aprofundada no segundo artigo proposto nesta dissertação, apresentado no Capítulo 5.

4 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE RESSALTO HIDRÁULICO SUBMERGIDO EM DIFERENTES ESCALAS

O presente artigo correlaciona-se com o cumprimento dos objetivos específicos (i) e (ii) elencados anteriormente. Assim, o trabalho tem por objetivo principal comparar resultados obtidos nas simulações computacionais com os dados obtidos nos modelos físicos hidráulicos e no protótipo da UHE Porto Colômbia. Ainda, o trabalho também possui o objetivo de divulgar para a comunidade científica as condições utilizadas nas simulações computacionais, a fim de contribuir com o desenvolvimento da pesquisa na área de simulações em CFD de ressaltos hidráulicos.

4.1 RESUMO

Construir, instrumentar e analisar modelos físicos em escala reduzida sempre se mostrou uma importante ferramenta para a análise de ressaltos hidráulicos. Com a evolução de computadores e de técnicas numéricas, as simulações com CFD de ressaltos hidráulicos se apresentam como um caminho interessante para a avaliação deste fenômeno. Todavia, as simulações computacionais, bem como as técnicas numéricas de solução, devem ser validadas a partir de dados medidos em experimentos físicos. Este estudo tem como objetivo comparar resultados obtidos em simulações com CFD com dados medidos em protótipo e em modelos físicos hidráulicos e equações empíricas apresentadas na literatura. Foram realizadas simulações para a estrutura do vertedouro e bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia em escalas 1:1, 1:32, 1:50 e 1:100. As simulações foram desenvolvidas através do solver Ansys CFX a partir de uma abordagem baseada em RANS, utilizando o modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$ e o método VOF para a solução da interface água-ar. As seguintes variáveis foram analisadas: pressões médias no fundo da bacia de dissipação, alturas conjugadas, posição de início do ressalto afogado, comprimento do rolo, representação da linha d'água e análise das velocidades. Foram obtidos resultados satisfatórios para as variáveis pressões médias, altura conjugada de montante, comprimento do rolo, perfil da linha d'água em regiões menos aeradas e velocidades no início do ressalto, onde foram observados erros ou diferenças médias menores que 10%. A posição de início do ressalto hidráulico afogado e a representação do perfil da linha d'água em zonas próximas a esta região

apresentaram resultados mais discrepantes. Conclui-se que os métodos e condições utilizados nas simulações mostram-se adequados para representar as variáveis que não possuem influência direta do fenômeno de aeração e que simulações com CFD caracterizam-se como recurso de grande utilidade para a avaliação de ressaltos hidráulicos.

4.2 INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é um fenômeno físico marcado pela transição abrupta de um escoamento supercrítico ($Fr > 1$), a montante, para um escoamento subcrítico ($Fr < 1$), a jusante. Este fenômeno instiga a investigação de cientistas há séculos, tendo por exemplo, os clássicos estudos de Bidone datados no primeiro terço do século XIX (DE PADOVA; MOSSA, 2021), além do desenvolvimento da Equação de Bélanger também na mesma época (CHANSON, 2009a; DE PADOVA; MOSSA, 2021).

Os estudos relacionados aos ressaltos hidráulicos ganharam força devido à sua grande aplicabilidade na engenharia hidráulica, devido a suas características turbulentas que proporcionam uma alta dissipação de energia durante sua ocorrência. Assim, a ocorrência desse fenômeno torna-se atrativa em estruturas de dissipação de energia em sistemas de segurança de barramentos, tal como bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico (DAI PRÁ, 2011).

Além da descrição analítica desse fenômeno, a utilização de modelos físicos hidráulicos, através da sua instrumentação e análise de dados coletados, é uma das maneiras mais antigas de coletar informações para o dimensionamento de estruturas hidráulicas (HELLER, 2011; PFISTER; CHANSON, 2012; YALIN, 1971). Dentre os estudos de ressaltos hidráulicos em modelos físicos, destacam-se os realizados por Peterka (PETERKA, 1984), Rajaratnam (RAJARATNAM, 1965a, 1965b, 1967), além dos dados compilados e divulgados por Hager (HAGER, 1992) e Hager e Bremen (HAGER; BREMEN, 1989).

Todavia, análises realizadas a partir de modelos físicos hidráulicos também possuem erros inerentes, ocasionados, principalmente, pela impossibilidade de garantir semelhança completa (geométrica, cinemática e dinâmica) do modelo com o protótipo. As principais diferenças encontradas entre as medições do protótipo e em

modelos são ocasionadas por três principais tipologias de efeitos: efeitos de modelo, efeitos de medição e efeitos de escala (HELLER, 2011).

Nesse contexto, a modelagem computacional passa a ser um caminho interessante para a investigação de fenômenos complexos, tal como ressaltos hidráulicos (CHANSON, 2009c, 2009b; DE PADOVA; MOSSA, 2021). Com o advento de computadores modernos e com maiores capacidades de processamento e memória, bem como a possibilidade de computação em nuvem, tornou-se possível investigar computacionalmente fenômenos mais complexos, que exigem um maior custo computacional nas suas simulações. Assim, simulações com CFD tem se tornado cada vez mais populares, até mesmo em computadores pessoais.

Dentre as diversas técnicas utilizadas destacam-se as que utilizam como modelo matemático as equações RANS, as quais são obtidas através da aplicação da decomposição de Reynolds às Equações de Navier-Stokes. Todavia, essas equações possuem um problema de fechamento, onde é necessário modelar o termo referente às tensões de Reynolds nas equações RANS. Diversas bibliografias consolidadas relativas ao estudo da mecânica dos fluidos e da turbulência tratam desse tema (BAILLY; COMTE-BELLOT, 2015; LESIEUR, 2008; POPE, 2000; WILCOX, 2006).

Os modelos computacionais baseados em RANS possuem um menor custo computacional quando comparados, por exemplo, às baseadas em DNS, as quais necessitam de malhas extremamente refinadas para representar todas as escalas de turbulência do escoamento a ser simulado. Assim, ao realizar simulações baseadas em RANS admite-se que nem todas as escalas de turbulência estão sendo simuladas e que alguns resultados obtidos nelas devem ser analisados com parcimônia.

Todavia, todo o resultado obtido em simulações computacionais deve ser validado, seja pela comparação com dados medidos ou com equações com soluções bem consolidadas. Deve-se também levar em conta todos os erros inerentes às fontes dos resultados, sejam elas de experimentos físicos, tal como a precisão dos equipamentos e erros de medição, ou de simulações computacionais, como efeitos de difusão numérica, imprecisão nos modelos numéricos adotados, entre outros. Assim, divulgar comparações de simulações com dados medidos em experimentos físicos apresenta-se com grande importância para o desenvolvimento da ciência na área.

Outra grande carência durante a etapa de validação e calibração de simulações computacionais é a disponibilidade de dados medidos em escala de protótipo. As

grandes dimensões observadas, somada a dificuldade de instrumentação de estruturas com escoamentos altamente turbulentos, aerados e com altas velocidades, tornam as medições intrusivas desses escoamentos raras, contudo, de extrema utilidade. No contexto brasileiro, destaca-se a campanha de medição de pressões instantâneas junto ao fundo da bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia (TEIXEIRA, 2008).

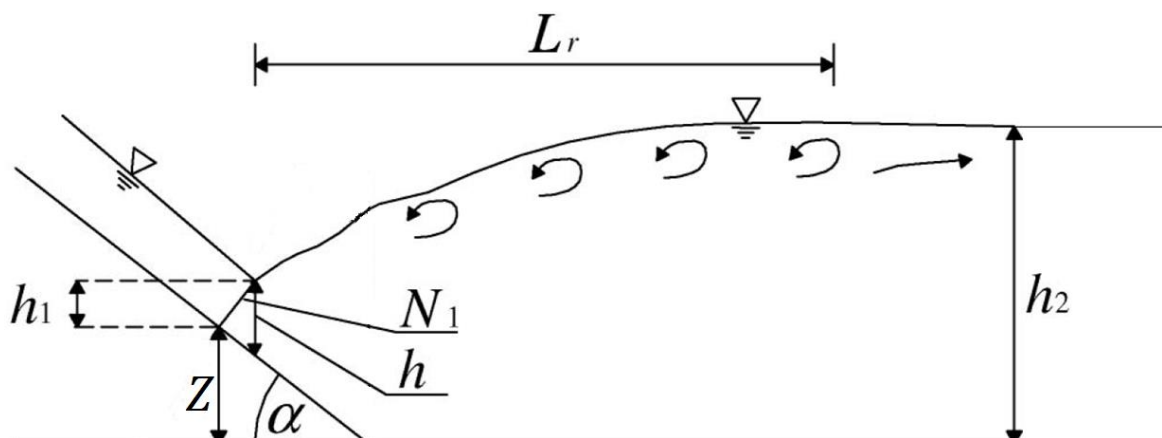
O presente estudo visa comparar os resultados obtidos em simulações com CFD, utilizando técnicas baseadas em RANS, com resultados medidos experimentalmente em três modelos físicos hidráulicos do sistema extravasor de cheias da UHE Porto Colômbia em diferentes escalas (1:32, 1:50 e 1:100), bem como com resultados medidos em escala de protótipo. Ainda, o presente estudo tem por objetivo observar se existe alguma relação entre a escala simulada e os resultados obtidos em simulação.

4.3 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir é apresentado o referencial teórico que embasará as comparações a serem apresentadas na etapa de apresentação de resultados. Sobretudo, deve-se levar em consideração que a tipologia de ressalto que ocorre na estrutura de dissipação de energia ora apresentada é relativa à tipologia B, conforme a descrição realizada por Kindsvater (1944, apud HAGER, 1992).

Esse tipo de ressalto hidráulico é caracterizado por possuir início ainda na calha inclinada no vertedouro e término no trecho plano, ou seja, na bacia de dissipação. Assim, todos os resultados e comparações apresentados a seguir tomaram como base equações descritas para essa tipologia de ressalto hidráulico. Na Figura 4.1 são apresentadas as variáveis característica de um ressalto hidráulico tipo B.

Figura 4.1 – Variáveis típicas de um ressalto hidráulico tipo B.



Fonte: Adaptado de Carollo, Ferro e Pampalone (2011).

O número de Froude, adimensional amplamente utilizado para a caracterização de escoamentos a superfície livre, incluindo ressaltos hidráulicos, apresenta a seguinte forma para a seção de montante da tipologia apresentada:

$$Fr_1 = \frac{q \cos(\alpha)}{\sqrt{g h_1^3}} \quad (4.1)$$

Onde q é a vazão por unidade de largura do vertedouro, m^2/s ; α é o ângulo formado entre a calha do vertedouro e o eixo horizontal, em graus; g é a aceleração gravitacional, em m/s^2 e; h_1 é a altura conjugada rápida do ressalto hidráulico, em m, conforme apresentada na Figura 4.1.

Na sequência, em um momento anterior à apresentação da metodologia empregada no presente estudo, é apresentado um referencial teórico relativo às variáveis de análise examinadas, apresentando subsídios às comparações apresentadas no capítulo referente aos resultados e discussões deste trabalho.

4.3.1 Pressões Médias no Fundo da Bacia de Dissipação

Conhecer as pressões médias no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, bem como as flutuações de pressão, valores extremos e sua probabilidade de ocorrência, são de grande importância para projetar e dimensionar bacias de dissipação de energia de maneira segura e econômica.

Teixeira (2008) apresentou uma investigação experimental das pressões médias no fundo da bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, utilizando dados medidos em três modelos físicos hidráulicos de diferentes escalas e medições em

escala de protótipo. O objetivo principal do trabalho de Teixeira (2008) era a investigação do efeito de escala nas pressões médias desta estrutura. Todavia, apenas a divulgação dos dados experimentais de pressão média já apresenta grande importância, principalmente para trabalhos de âmbito computacional que visam comparar dados simulados com dados medidos, tal como o estudo ora apresentado.

4.3.2 Alturas Conjugadas

As alturas conjugadas de um ressalto hidráulico são duas das variáveis mais antigas utilizadas para descrever esse fenômeno. Devido à aplicabilidade do ressalto hidráulico nas obras de engenharia, novas equações empíricas relativas às alturas conjugadas foram desenvolvidas e aplicadas às diferentes tipologias de ressalto hidráulico existentes.

Com relação ao ressalto hidráulico do tipo B, foram verificadas quatro equações que atendem as características do ressalto hidráulico que ocorre na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, as quais foram expostas nos trabalhos de Carollo, Ferro e Pampalone (2011) e Teixeira (2008).

Teixeira (2008), de onde foram retirados parte dos dados experimentais utilizados no presente trabalho, utilizou-se de medições de níveis d'água, aplicando-os às equações unidimensionais da conservação de massa, quantidade de movimento e energia para o cálculo da altura conjugada rápida (h_1) e da equação de Bélanger (Equação 4.2) para o cálculo da altura conjugada lenta (h_2^*), que serviram como base para a adimensionalização dos resultados apresentados no trabalho.

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \quad (4.2)$$

Embora o resultado obtido pela Equação 4.2 não caracterize a grandeza física mensurável relativa à altura conjugada lenta, ou de jusante, (h_2) de um ressalto hidráulico do tipo B, o mesmo foi utilizado para o cálculo desta variável nos trabalhos de Teixeira (2008), Teixeira et al. (2012) e Wiest et al. (2020) para a adimensionalização de variáveis. Assim, para evitar interpretações errôneas das variáveis utilizadas nas equações do presente trabalho será mantida a variável h_2^* como a altura conjugada lenta calculada através da Equação de Bélanger.

Ressalta-se que outros autores desenvolveram equações empíricas específicas para o cálculo da altura conjugada lenta para ressaltos hidráulicos do tipo

B (CAROLLO; FERRO; PAMPALONE, 2011; HAGER, 1988; HAGER; BREMEN, 1989; KAWAGOSHI; HAGER, 1990).

4.3.3 Posição de Início do Ressalto Afogado

Determinar a posição correta do início de ressaltos hidráulicos do tipo B implica, em etapa de projeto, em calcular corretamente outras variáveis que se utilizam dessa posição. A determinação da posição de início do ressalto afogado também mostra importância, por exemplo, na definição das cotas e dimensões de vigas munhão em vertedouros com soleira controlada.

Wiest et al. (2020) desenvolveram uma equação para determinar a altura de início de ressaltos hidráulicos do tipo B com base em dados medidos no modelo em escala 1:50 da estrutura de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia. Nesse trabalho os autores utilizaram dados medidos para vazões de 1.000 m³/s a 8.000 m³/s, em escala de protótipo, para diferentes graus de submergência. Os autores apresentaram a seguinte equação (Equação 4.3) para a definição da variável Z .

$$\frac{Z}{h_c} = [Fr_1 (S - 1)]^{0,61} \quad (4.3)$$

Onde Z é a diferença de cotas entre a posição de início do ressalto hidráulico na calha do vertedouro e a cota de fundo da bacia de dissipação (ver Figura 4.1), h_c é a profundidade crítica do escoamento referente a um canal retangular, dada por $h_c = (q^2 / g)^{1/3}$ e; S é a submergência do ressalto, calculada por $S = T_W / h_2^*$, onde T_W é a profundidade da água no canal a jusante.

A determinação da posição horizontal de início do ressalto afogado também impacta indiretamente a determinação de outras variáveis do ressalto, tal como o comprimento do rolo. Na modelagem física, a determinação dessa posição pode ser dificultada devido às características bifásicas e turbulentas do escoamento, principalmente nas regiões iniciais do ressalto hidráulico.

4.3.4 Comprimento do Rolo

O comprimento do rolo do ressalto hidráulico apresenta-se como um parâmetro de grande importância, pois é a partir deste ponto que as flutuações de pressão junto ao fundo apresentam-se mais tênues, com uma menor energia cinética de turbulência.

Em termos de projeto de bacias de dissipação de energia, essa assertiva se traduz no comprimento que deve ser adotado para essa estrutura de dissipação. Logo, a determinação do comprimento do rolo do ressalto hidráulico apresenta-se importante pois, ao não superdimensionar o comprimento da bacia de dissipação, garante-se economia significativa na execução do sistema extravasor de cheias.

Hager, Bremen e Kawagoshi (1990) definem o comprimento do rolo como o ponto de estagnação das velocidades na superfície livre do ressalto, onde pode-se visualizar a separação do escoamento que segue para jusante e o que retorna para montante. Marques, Drapeau e Verrette (1997) definem o final do rolo do ressalto como a região onde o coeficiente de assimetria das amostras de pressão assume seu valor mínimo. Em experimentação física, esse ponto pode não ser de fácil leitura devido à alta complexidade e turbulência do ressalto hidráulico. Todavia, em simulações computacionais esse ponto de estagnação pode ser facilmente visualizado, facilitando a medição do comprimento do rolo do ressalto hidráulico (VALERO; BUNG; CROOKSTON, 2018).

Para ressaltos hidráulicos do tipo B foram verificadas duas equações empíricas utilizadas para calcular o comprimento do rolo do ressalto (ADAM et al., 1993; CAROLLO; FERRO; PAMPALONE, 2012). Adam et al. (1993), utilizando dados de um experimento físico com declividade de calha de 11,3°, 14,0° e 18,4°, chegaram a expressão apresentada na Equação 4.4.

$$\frac{L_r}{H_L} = 42,67 \exp\left(-4,462 \frac{H_L}{H_1}\right) \quad (4.4)$$

Onde L_r é o comprimento do rolo, em m, H_L é a perda de carga no ressalto hidráulico, dada por $(H_1 - H_2)$, sendo que H_1 e H_2 são as energias nas seções de montante e de jusante do ressalto, respectivamente, dadas na forma $H_i = z_i + h_i + V_i^2/(2g)$, em m.

Já o trabalho de Carollo, Ferro e Pampalone (2012) apresentou uma nova equação empírica (Equação 4.5) para a determinação do comprimento do rolo, a qual aplica-se tanto para ressaltos hidráulicos livres com superfícies lisas ou rugosas, quanto para ressaltos hidráulicos do tipo B com superfícies lisas. A equação apresentada pelos autores foi obtida a partir de dados experimentais com angulações de calha variando entre 0° e 45°.

$$\frac{L_r}{H_L} = [7,965 + 20,72 (\tan \alpha)^{0,39}] \left(\frac{H_L}{H_1}\right)^{-0,534} \exp\left(-\frac{H_L}{H_1} \frac{1}{0,168}\right) - \left[1 - \exp\left(-\frac{H_L}{H_1} \frac{1}{0,168}\right)\right] 4,124 \ln\left(\frac{H_L}{H_1}\right) \quad (4.5)$$

Onde α é o ângulo entre a calha e o eixo horizontal, em graus, e as outras variáveis são as mesmas apresentadas na Equação 4.4.

4.3.5 Linha d'Água

A leitura do perfil da superfície livre de ressaltos hidráulicos, ou perfil da linha d'água, pode ser realizada a partir de diferentes aparatos de instrumentação em modelos físicos hidráulicos. As medições de superfície livre realizadas nos modelos relativos ao vertedouro da UHE Porto Colômbia, por exemplo, foram realizadas através de pontas limnimétricas e/ou através da captura de imagens (TEIXEIRA, 2008). Destacam-se também outros métodos não intrusivos de medição da linha d'água de ressaltos hidráulicos, como a medição por sensores ultrassônicos (NÓBREGA; SCHULZ; ZHU, 2014) e medições com perfiladores a laser (MACIÁN-PÉREZ et al., 2020a).

As características altamente turbulentas e bifásicas dos ressaltos hidráulicos dificultam a leitura do perfil da linha d'água. O ar é introduzido na região do rolo do ressalto principalmente devido ao impacto do jato de alta velocidade no fundo do canal, oriundo do escoamento supercrítico a montante (CHANSON, 2009c). Marques et al. (2007) apresentam um compilado de trabalhos relativo ao fenômeno de aeração em ressaltos hidráulicos, o qual conclui que as maiores concentrações médias de ar se localizam na região inicial do ressalto. Assim, as medições do perfil da linha d'água são dificultadas nessa região.

No âmbito computacional, quando utilizados métodos baseados em funções escalares para a definição da interface entre fluidos, tal como método VOF (HIRT; NICHOLS, 1981), há a necessidade de definir a magnitude da fração entre os fluidos (α) que represente a superfície livre do escoamento. Uma das hipóteses para definir essa questão é admitir que o equilíbrio entre as fases ($\alpha = 0,5$) representa a superfície livre do escoamento.

4.3.6 Análise de Velocidades

Tal como para a medição de níveis d'água apresentada acima, a medição de velocidades em escoamentos altamente turbulentos apresenta-se como uma tarefa árdua, a qual possui sua dificuldade aumentada em escoamentos aerados e altamente energéticos, como é o caso de ressaltos hidráulicos.

A medição de velocidades em ressaltos hidráulicos pode ocorrer através de métodos intrusivos, como o Velocímetro Doppler Acústico (ADV, do inglês *Acoustic Doppler Velocimeter*), e não intrusivos, como o Anemômetro a Laser por Efeito Doppler (LDA, do inglês *Laser Doppler Anemometer*). Recentemente Hohermuth, Boes e Felder (2021) desenvolveram um aparato para medições de escoamentos aerados em escala de protótipo. As sondas apresentadas pelos autores conseguem realizar medições de frações de ar, contagem de bolhas, velocidade da interface e tamanho de gotículas para escoamentos com $Re > 10^7$ e velocidades médias de escoamento de até 38 m/s.

4.4 METODOLOGIA

O objeto de estudo das simulações realizadas trata do sistema extravasor de cheias da UHE Porto Colômbia, o qual é constituído de um vertedouro de soleira controlada, seguido por uma calha rápida, a qual concorda com a bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico através de uma curva de concordância. O ressalto hidráulico observado nessa estrutura é relativo a um ressalto do tipo B, conforme a descrição proposta por Kindsvater (1944, apud HAGER, 1992). Ressaltos do tipo B são caracterizados por serem ressaltos submergidos, onde sua posição de início ocorre ainda na calha do vertedouro e seu término na porção horizontal do sistema, na bacia de dissipação. Comumente essa tipologia de ressaltos hidráulicos é descrita apenas como ressalto hidráulico afogado.

Os resultados medidos em experimentos físicos, os quais serão comparados com os resultados das simulações realizadas, foram divulgados pelos trabalhos de Teixeira (2008), Wiest (2008), Teixeira et al. (2012) e Wiest et al. (2020). Ainda, foram verificados outros estudos de carácter computacional relativos ao vertedouro da UHE Porto Colômbia (AMORIM; AMANTE; BARBOSA, 2015; AMORIM; RODRIGUES; MARQUES, 2004; RODRIGUES, 2002).

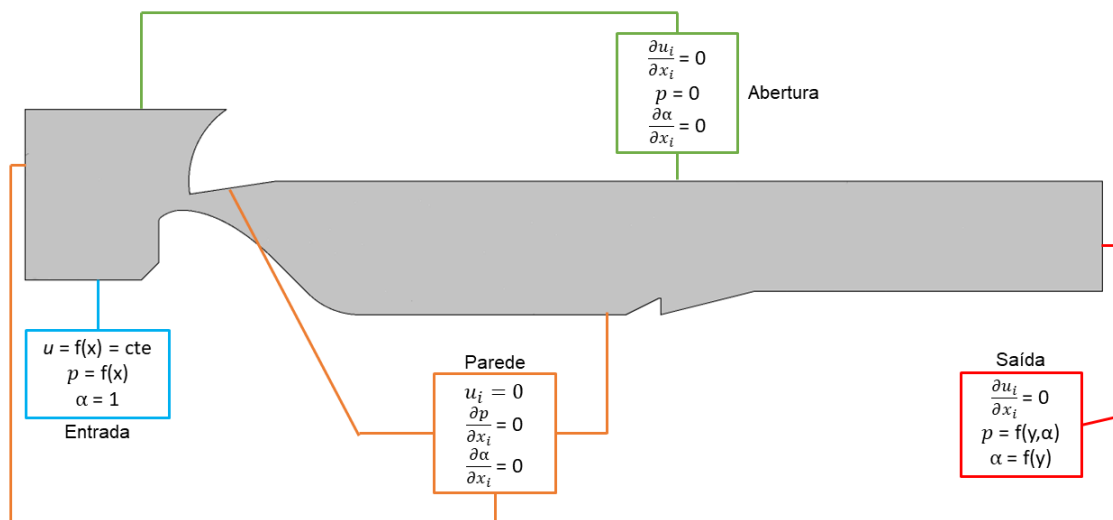
As simulações foram realizadas no solver Ansys CFX, através da plataforma Ansys Workbench, onde também foram realizadas a modelagem do domínio de simulação e a geração da malha. Foi utilizado um domínio tridimensional, todavia, com características seccionais. O Ansys CFX utiliza-se de uma abordagem de volumes finitos para suas soluções numéricas, usando como modelos matemáticos globais as equações médias da continuidade (equações 4.6) e RANS (equações 4.7) para um fluido newtoniano e incompressível, apresentadas a seguir em formato tensorial. Foi utilizada uma solução de regime permanente no Ansys CFX, onde o avanço temporal da solução é realizado por um falso passo de tempo, até que os critérios mínimos de residuais adotados ou o número máximo de iterações seja atingido.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.6)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \rho \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (4.7)$$

Como condições de contorno, foi utilizada uma condição de entrada em termos de vazão mássica, a montante, correspondente a uma vazão de água de 4.000 m³/s (em escala de protótipo); uma condição de saída, com nível d'água constante com pressão hidrostática; condições de parede admitindo não deslizamento onde também não ocorre trocas de massa; condições de simetria nas áreas laterais do domínio e; condições de abertura na parte superior. A Figura 4.2 apresenta as condições de contorno adotadas e o domínio de simulação utilizado.

Figura 4.2 – Domínio de simulação e condições de contorno.



A modelagem da interface água-ar foi realizada a partir do método VOF, descrito por Hirt e Nichols (1981), através de um modelo multifásico homogêneo, já implementado no solver Ansys CFX (ANSYS, 2009) e utilizado em modelagem computacional de ressaltos hidráulicos (BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015; BAYON et al., 2016; MACIÁN-PÉREZ et al., 2020b; VALERO; BUNG; CROOKSTON, 2018). Adotou-se como interface água-ar uma fração $\alpha = 0,5$, ou seja, fração que representa o equilíbrio entre essas fases. A partir desse valor, foram traçadas isosuperfícies que auxiliaram, na determinação das profundidades do escoamento em diversos pontos e a posição do início do ressalto.

O início do ressalto hidráulico afogado foi determinado na posição que escoamento de retorno do rolo do ressalto encontra o escoamento rápido sobre a calha do vertedor a uma fração água-ar $\alpha = 0,5$. A partir desse ponto pode-se medir, perpendicularmente à calha, a altura conjugada de montante do ressalto hidráulico e determinar a velocidade média nessa seção, através de um plano perpendicular à calha, com a mesma largura do domínio e altura h_1 .

Para o fechamento das equações RANS e, comutativamente, modelagem da turbulência, foi utilizado o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$, proposto por Yakhot et al. (1992). O modelo é uma derivação do modelo $\kappa - \varepsilon$ tradicional, com a diferença que o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ depende menos de constantes empíricas quando comparado ao modelo $\kappa - \varepsilon$ tradicional (AMORIM; AMANTE; BARBOSA, 2015) e utilizado em simulações com CFD de ressaltos hidráulicos baseadas em RANS (BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015; BAYON et al., 2016; MACIÁN-PÉREZ et al., 2020b; VALERO; BUNG; CROOKSTON, 2018).

A malha foi gerada na ferramenta Ansys Meshing. Foi utilizada uma malha prismática piramidal triangular, com um esquema de inflação de malha a partir da calha do vertedouro. Utilizou-se um refinamento de malha na região de ocorrência do ressalto hidráulico, na bacia de dissipação. Os elementos na região refinada possuem dimensões características de 0,16 m, em escala de protótipo, e adaptados através da escala geométrica conforme a escala da simulação desejada. O número elementos de malha, para todas as escalas, foi da ordem de $3,0 \times 10^6$ elementos.

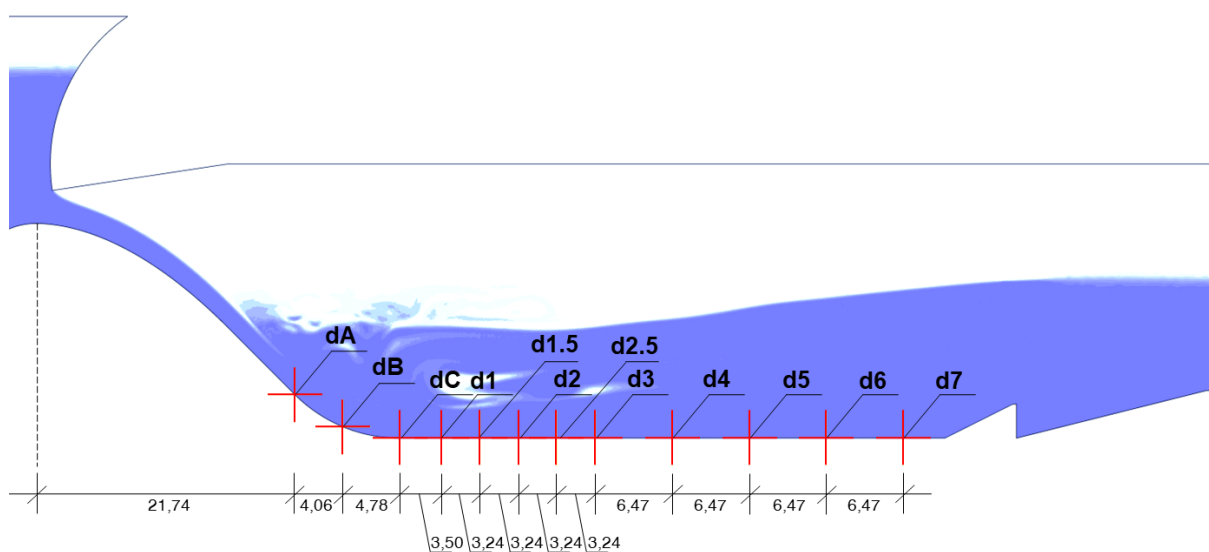
A definição e validação das malhas foram realizadas através do cálculo do GCI. Proposto por Roache (1997) e sistematizado por Celik et al. (2008), o GCI é um método iterativo que avalia a incerteza numérica ao adotar uma malha com certa discretização, comparando os resultados de variáveis obtidos na simulação desta com

resultados obtidos em simulações utilizando outra ou mais malhas de discretização diferentes. O GCI foi calculado tomando como base as pressões médias nos pontos de interesse no fundo da calha, para cada uma das quatro escalas simuladas. A relação entre as malhas grosseira, média e refinada verificadas, na região de ocorrência do ressalto hidráulico, foi de 40%, ou seja, $l_{medium}/l_{coarse} = l_{fine}/l_{medium} = 1,4$, onde l refere-se a dimensão característica da malha e os índices *coarse*, *medium* e *fine* referem-se ao grau de detalhamento das malhas. Foram obtidos GCIs médios de 3,66%, 2,78%, 3,21% e 5,47% para as escalas 1:1, 1:32, 1:50 e 1:100, respectivamente.

Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com resultados medidos em modelos físicos hidráulicos em escalas 1:32, 1:50 e 1:100, além de dados medidos em escala de protótipo. Outras variáveis que não foram medidas, mas sim calculadas indiretamente, foram comparadas com equações obtidas na literatura. Foi realizada a análise das seguintes variáveis: pressões médias (P) no fundo da bacia de dissipação; altura conjugada rápida do ressalto hidráulico (h_1); altura de início do ressalto afogado (Z); comprimento do rolo (L_R); perfil da linha d'água ao longo da bacia e; análise de velocidades ao longo do ressalto. Apenas as variáveis de pressão média e linha d'água foram obtidas diretamente dos resultados de medições apresentados por Teixeira (2008). As outras variáveis foram comparadas com resultados calculados indiretamente ou com equações presentes da literatura.

Os dados de pressão média no fundo da calha e níveis da água, retirados dos trabalhos de Teixeira (2008) e Teixeira et al. (2012), foram medidos em posições específicas ao longo da calha e da bacia de dissipação, as quais são apresentadas na Figura 4.3. A nomenclatura dos pontos de medição foi preservada em relação aos trabalhos de Teixeira (2008) e Teixeira (2012).

Figura 4.3 – Posições das tomadas de pressão. Medidas apresentadas em metros e em escala de protótipo.



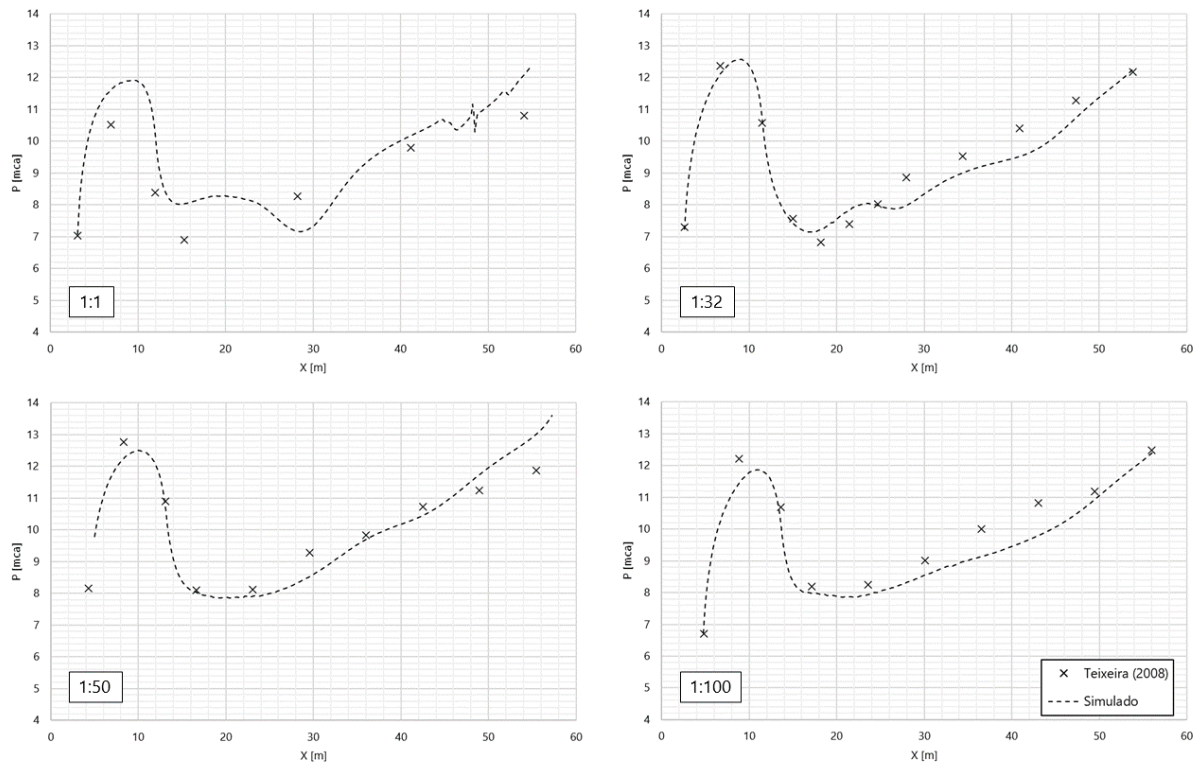
Ressalta-se que tanto nos modelos físicos quanto no protótipo não foram coletadas as medições de pressão e nível d'água em todas as posições apresentadas na Figura 4.3, com exceção do modelo em escala 1:32, onde foram realizadas medições em todas as posições. Nos modelos em escala 1:50 e 1:100 não foram coletadas medições na posição das sondas d1.5 e d2.5, enquanto no protótipo não foram realizadas coletas nas sondas d1.5, d2, d2.5, d4 e d6. Maiores detalhes sobre a instrumentação dos modelos e do protótipo podem ser encontrados em Teixeira (2008), Wiest (2008), Carvalho (2010), Teixeira et al. (2012) e Wiest et al. (2020).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo serão apresentados e discutidos na mesma ordem em que foram abordados no referencial teórico: pressões médias no fundo da bacia de dissipação, altura conjugada rápida, altura de início do ressalto afogado, comprimento do rolo do ressalto, perfil da linha d'água e análise das velocidades.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados das simulações relativos às pressões médias no fundo da bacia de dissipação para as quatro diferentes escalas simuladas, comparando-os com os dados de pressão média apresentados por Teixeira (2008) para a mesma estrutura. As origens das abscissas são relativas ao início do ressalto hidráulico e os dados de pressão, apresentados em metros de coluna de água (mca), foram transpostos para escala de protótipo.

Figura 4.4 – Pressões médias no fundo da bacia de dissipação de energia. Dados em escala de protótipo.



Observa-se que os dados de pressão média obtidos nas simulações refletem de maneira satisfatória a tendência observada nos valores medidos nos três modelos físicos hidráulicos. No protótipo nota-se uma variação maior entre os dados simulados e os observados, superestimando as pressões médias na curva de concordância e no início da bacia de dissipação. Ainda, é observado um decréscimo na pressão média em $X \cong 12$.

Na Tabela 4.1 são apresentados os erros relativos de pressão média observados, bem como uma média dessas variáveis para cada uma das escalas simuladas.

Tabela 4.1 – Comparação das pressões médias entre dados observados (TEIXEIRA, 2008) e simulados. Valores em escala de protótipo.

| Sonda | Pressão Média (mca) | | | | | | | | Erro (%) | | | |
|-------|---------------------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|------|------|-------|
| | Teixeira (2008) | | | | Simulado | | | | | | | |
| | 1:1 | 1:32 | 1:50 | 1:100 | 1:1 | 1:32 | 1:50 | 1:100 | 1:1 | 1:32 | 1:50 | 1:100 |
| dA | 7,03 | 7,30 | 8,16 | 6,71 | 7,11 | 7,38 | 7,94 | 7,21 | 1,1 | 1,1 | 2,7 | 7,5 |
| dB | 10,52 | 12,37 | 12,77 | 12,21 | 11,62 | 12,13 | 12,26 | 11,55 | 10,5 | 2,0 | 4,0 | 5,4 |
| dC | 8,39 | 10,57 | 10,90 | 10,69 | 10,17 | 10,71 | 10,57 | 10,07 | 21,2 | 1,3 | 3,0 | 5,8 |
| d1 | 6,91 | 7,57 | 8,10 | 8,20 | 8,04 | 7,42 | 8,03 | 7,55 | 16,4 | 1,9 | 0,9 | 7,9 |
| d1.5 | - | 6,83 | - | - | - | 7,22 | | | - | 5,6 | - | - |
| d2 | - | 7,40 | 8,13 | 8,24 | - | 7,83 | 7,91 | 8,09 | - | 5,8 | 2,7 | 1,9 |
| d2.5 | - | 8,03 | - | - | - | 7,98 | | | - | 0,7 | - | - |
| d3 | 8,27 | 8,86 | 9,29 | 9,01 | 7,18 | 7,97 | 8,53 | 8,43 | 13,2 | 10,1 | 8,2 | 6,4 |
| d4 | - | 9,54 | 9,83 | 10,00 | - | 9,00 | 9,71 | 8,91 | - | 5,7 | 1,2 | 10,9 |
| d5 | 9,79 | 10,40 | 10,73 | 10,83 | 10,18 | 9,51 | 10,46 | 9,52 | 3,9 | 8,5 | 2,5 | 12,1 |
| d6 | - | 11,29 | 11,25 | 11,19 | - | 10,73 | 11,75 | 11,10 | - | 5,0 | 4,4 | 0,8 |
| d7 | 10,80 | 12,19 | 11,88 | 12,47 | 12,09 | 12,25 | 13,03 | 12,47 | 11,9 | 0,5 | 9,7 | 0,0 |

Da análise dos erros apresentados na Tabela 4.1 também se observa que 50% destes apresentam-se menores que a incerteza relacionada a malha, calculada pelo GCI, para pressões médias na escala 1:32, 60% para a escala 1:50 e 40% para a escala 1:100. Já para os resultados de pressões médias na escala de protótipo, todos os erros observados foram maiores que a incerteza relacionada a malha.

Outro fato de notório interesse é relativo ao pico de pressão observado na curva de concordância. Devido à mudança da direção do escoamento na curva de concordância, manifestam-se forças inerciais centrífugas devido à presença de acelerações verticais e normais ao escoamento. A atuação dessa força aumenta de forma gradativa até o centro da curva, onde é verificada a máxima pressão média (LINFU; JIE, 1985, *apud* DAI PRÁ et al., 2012). Todavia, observa-se na Figura 4.4 que o ponto de máxima pressão média localiza-se além do ponto central da curva, em $X \cong 8$.

Para a determinação dos níveis da água obtidos nas simulações foi considerada uma fração da interface água-ar $\alpha = 0,5$ como a interface entre estes fluidos. Os valores de altura conjugada rápida (h_1) obtidos nas simulações foram comparados com os resultados calculados por Teixeira (2008). A Tabela 4.2 expõe

essa comparação, além de apresentar a diferença percentual média entre esses valores.

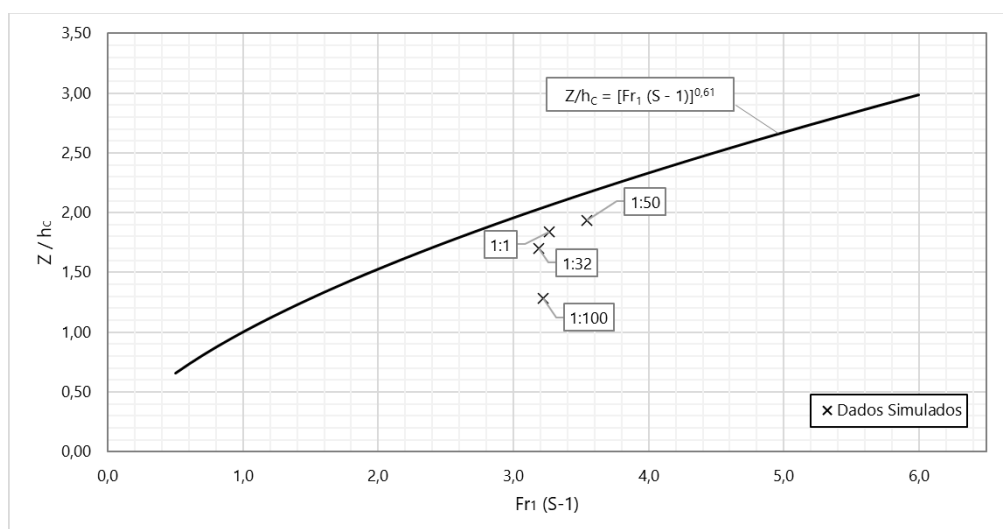
Tabela 4.2 – Comparação entre os valores de h_1 calculados por Teixeira (2008) com os resultados das simulações.

| Escala | h_1 [m] | | Diferença (%) |
|--------|-----------------|----------|---------------|
| | Teixeira (2008) | Simulado | |
| 1:1 | 1,179 | 1,120 | 4,93 |
| 1:32 | 1,161 | 1,085 | 6,57 |
| 1:50 | 1,197 | 1,154 | 3,52 |
| 1:100 | 1,181 | 1,167 | 1,19 |

Nota-se que os resultados obtidos em simulação se aproximam dos resultados calculados por Teixeira (2008) para essa variável, apresentando diferenças percentuais relativas de 1,19% a 6,57%. É uma prática comum entre projetistas de estruturas hidráulicas de dissipação de energia calcular a altura conjugada rápida de um ressalto hidráulico através de equações de conservação de massa e energia unidimensionais, tal como realizado por Teixeira (2008). Portanto, verifica-se que as simulações em CFD, para as condições e modelos utilizados, mostram-se satisfatórias para calcular essa variável.

Quanto à altura de início do ressalto afogado, os valores obtidos nas simulações foram comparados com a equação proposta por Wiest et al. (2020), representada pela Equação 4.3. Na Figura 4.5 pode ser visualizada esta comparação.

Figura 4.5 – Comparação da equação apresentada por Wiest et al. (2020) com dados obtidos em simulação.

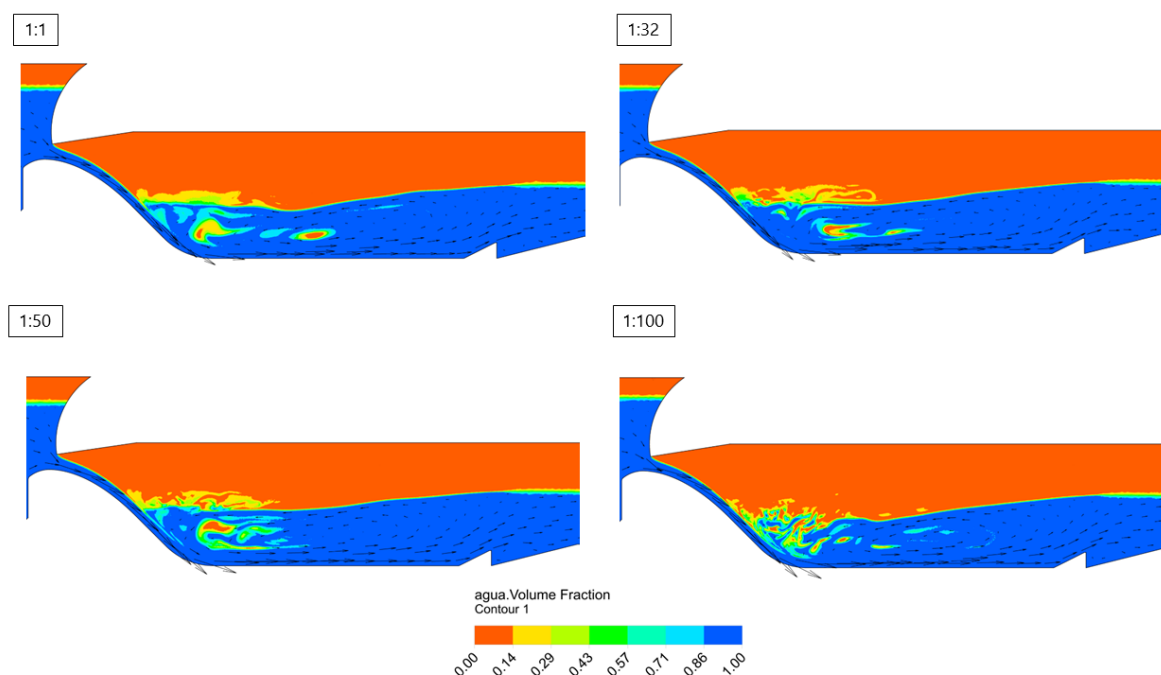


Ressalta-se que para o cálculo da submergência ($S = T_W/h_2^*$) dos dados simulados foram utilizados os valores de h_2^* , calculados a partir da equação de Bélanger (Equação 4.2). Foi admitida essa metodologia de cálculo pois os dados que Wiest et al. (2020) utilizaram para a elaboração da Equação 4.3 também se deram com base em h_2^* .

As simulações em CFD, para as condições e modelos utilizados, apresentaram resultados com variações de 11,7%, 19,5% e 11,8% em comparação com a Equação 4.3 para as escalas 1:1, 1:32 e 1:50, respectivamente. Já os resultados obtidos na simulação em escala 1:100 para essa variável foram subestimados em relação à Equação 4.3 em 59,3%, ou seja, com uma cota de início inferior à calculada pela equação de Wiest et al. (2020).

A simulação em escala 1:100, diferentemente das outras escalas, apresentou maior indefinição em relação às frações água-ar observadas na região do pé do ressalto, dificultando a localização de início do ressalto hidráulico. A Figura 4.6 apresenta a dificuldade visualizada, onde o pé do ressalto hidráulico afogado na simulação em escala 1:100 não se apresenta com a mesma uniformidade de contornos que os resultados para as outras escalas.

Figura 4.6 – Frações água-ar para as quatro escalas simuladas.

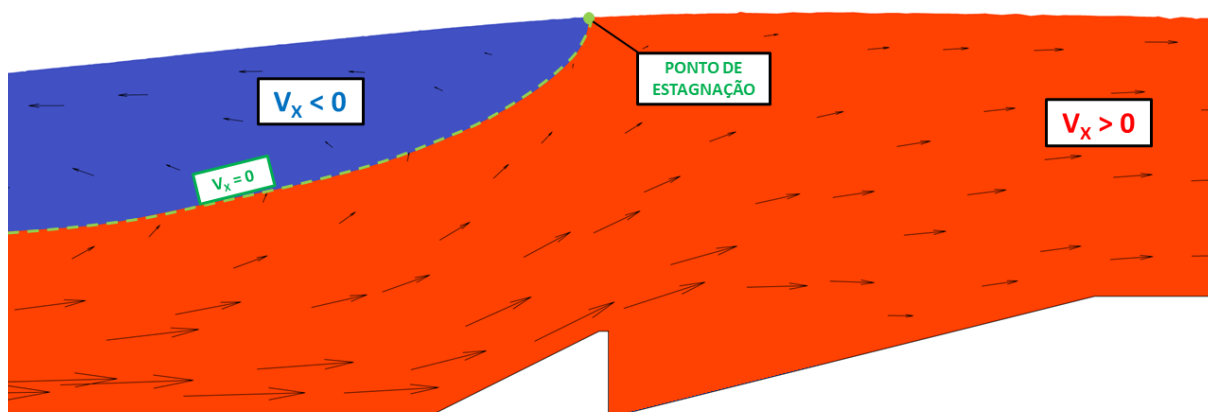


Entretanto, deve ser levado em consideração que as posições de início do ressalto apresentadas por Wiest et al. (2020) foram medidas a partir de pontas

limnimétricas e que, conforme apresentado no referencial teórico, estas medições são dificultadas devido à alta concentração de ar e turbulência nesta região.

Em relação ao comprimento do rolo do ressalto hidráulico, a assertiva apresentada por Valero, Bung e Crookston (2018), de que em simulações computacionais a região do rolo do ressalto hidráulico pode ser facilmente definida, vai ao encontro ao resultados apresentados na Figura 4.7, onde a magnitude das velocidades na direção longitudinal foi filtrada entre valores positivos e negativos, apresentando o ponto de estagnação.

Figura 4.7 – Visualização do ponto de estagnação, indicando o fim do rolo do ressalto hidráulico.



Assim, facilmente foram definidas as posições de término do rolo do ressalto hidráulico para todas as escalas e, a partir destas, foi possibilitada a medição do comprimento do rolo. Os resultados das simulações foram comparados com seis equações empíricas apresentadas no referencial teórico e essa comparação é apresentada na Tabela 4.3.

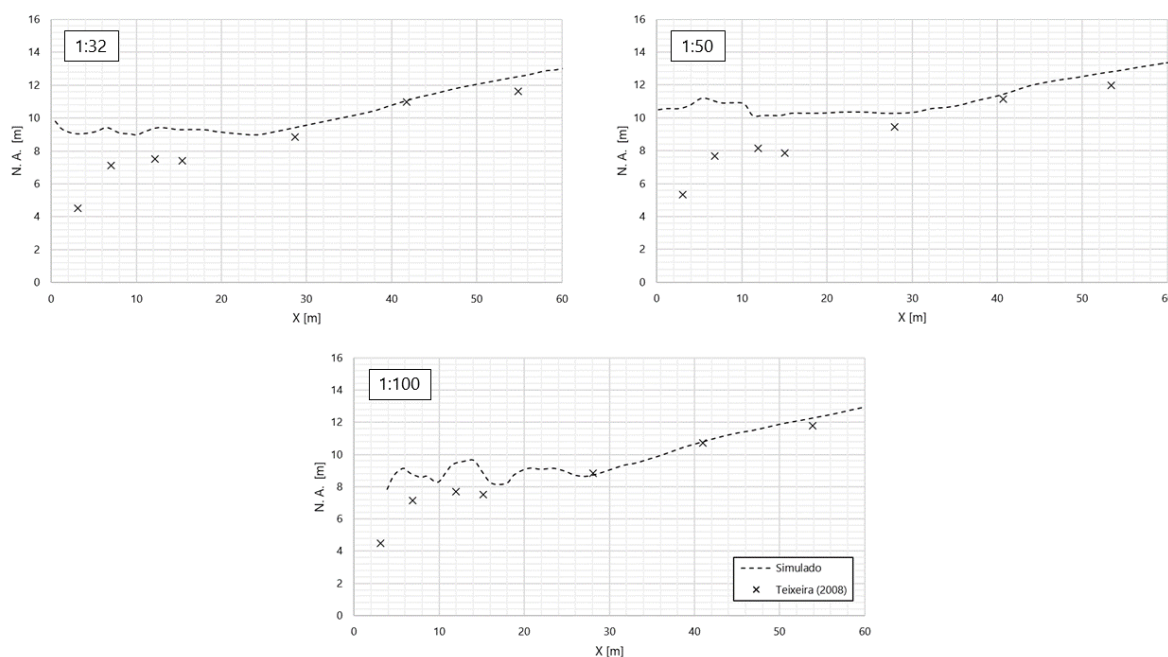
Tabela 4.3 – Comparação entre o comprimento do rolo do ressalto hidráulico simulado com o calculado por equações empíricas.

| Escala | L_R [m] | | | $ L_{R,Sim.} - L_{R,Calc.} / L_{R,Sim.}$ [%] | |
|--------|-----------|---------|---------|---|---------|
| | Sim. | Eq. 4.4 | Eq. 4.5 | Eq. 4.4 | Eq. 4.5 |
| 1:1 | 64,8 | 55,1 | 58,1 | 14,9 | 10,3 |
| 1:32 | 62,9 | 55,4 | 58,3 | 11,9 | 7,2 |
| 1:50 | 63,8 | 58,2 | 61,4 | 8,8 | 3,8 |
| 1:100 | 61,7 | 56,5 | 59,9 | 8,5 | 3,0 |

Os comprimentos do rolo do ressalto hidráulico calculados pela equação 4.5 e (CAROLLO; FERRO; PAMPALONE, 2012) foi o que apresentou a menor variação média entre as escalas com relação aos dados simulados, demonstrando uma diferença média de 6,1%.

Outro dado apresentado por Teixeira (2008) foram as profundidades do escoamento ao longo do ressalto hidráulico, medidas na mesma posição que as tomadas de pressão anteriormente apresentadas. Os dados foram medidos para as três escalas de modelo ensaiadas (1:32, 1:50 e 1:100) e a comparação entre os dados simulados e observados pode ser visualizada na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Comparação entre a linha d'água simulada com a observada (TEIXEIRA, 2008).



Nota-se, para todas as escalas de modelos, que o perfil da linha d'água é superestimado nas simulações na posição próxima às quatro primeiras posições (dA, dB, dC e d1), em $0 < X \leq 16$, as quais localizam-se na curva de concordância e no início da bacia de dissipação. O erro para estas quatro posições e entre todas as escalas figura-se em média 43,4%. Todavia, os níveis d'água simulados nas posições das sondas finais (d3, d5 e d7), em $X > 16$, apresentam uma boa aderência aos dados observados e divulgados por Teixeira (2008), com um erro médio de 4,0%.

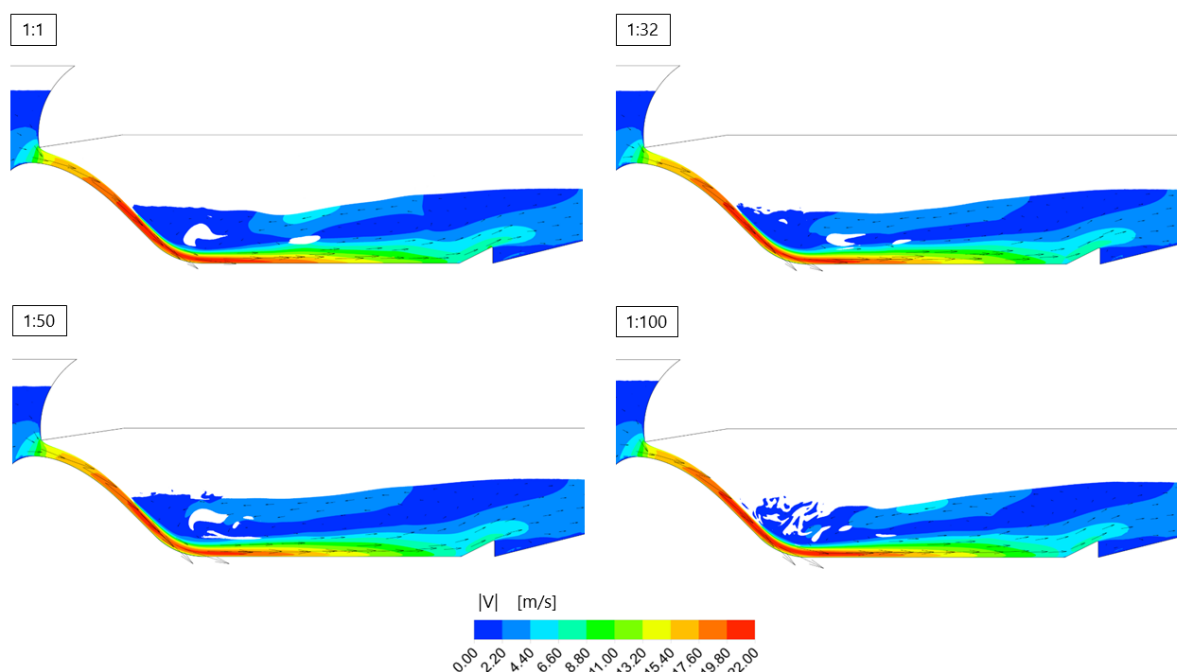
Conforme descrito por Teixeira (2008), a medição dos níveis d'água nos experimentos físicos ocorreu através de pontas limnimétricas. Conforme apresentado

por Marques, Drapeau e Verrette (1997), as regiões onde ocorrem as maiores flutuações de pressão localizam-se próximas ao ponto $1,75 (h_2 - h_1)$ e, segundo Marques et al. (2007), a região de aeração situa-se do início do ressalto hidráulico até o ponto de máxima concentração de ar e pode-se equivaler à região de máxima flutuação de pressões. Assim, as medições de níveis d'água nessa zona através de pontas limnimétricas é dificultada.

Ainda, o presente estudo utilizou-se do método VOF para resolver o escoamento multifásico, solucionando as equações de transporte na interface água-ar. Deve-se ressaltar que esse método não consegue representar fenômenos de aeração com escala menor do que a malha utilizada na simulação (TORRES et al., 2021). Embora não se trate de ressaltos hidráulicos, mas sim para vertedouros em degraus, Alwon (2019) apresenta que o método VOF pode não ser adequado para a análise da incorporação de ar no escoamento. Ainda, Lopes, Leandro e Carvalho (2018), também para um vertedouro em degraus, afirmam que no modelo VOF não há um valor global de fração água-ar que represente a superfície livre. Portanto, mostra-se a necessidade de um estudo específico para avaliar o fenômeno de aeração na estrutura em análise.

Embora os trabalhos que divulgaram os resultados medidos em modelos físicos hidráulicos e no protótipo (TEIXEIRA, 2008; TEIXEIRA et al., 2012; WIEST, 2008; WIEST et al., 2020) da estrutura simulada não tenham apresentado dados de medição de velocidade, os resultados da simulação referente aos mesmos serão demonstrados e discutidos. A Figura 4.9 apresenta os campos de velocidade absoluta para as quatro escalas simuladas.

Figura 4.9 – Campo de velocidades para as diferentes escalas. Valores em escala de protótipo.



Nota-se que a magnitude das velocidades e padrões de recirculação do escoamento são preservados entre as diferentes escalas. Teixeira (2008) utilizou-se das equações de conservação de massa e energia unidimensionais para calcular a velocidade na seção de montante do ressalto hidráulico (V_1), a qual foi utilizada para calcular, também através das equações de conservação de massa e energia unidimensionais, a profundidade do escoamento na seção de montante do ressalto hidráulico. A Tabela 4.4, realiza uma comparação entre as velocidades calculadas por Teixeira (2008) e as velocidades médias obtidas em simulação para a seção de montante do ressalto hidráulico, obtidas através da média dos vetores de velocidade em um plano perpendicular ao escoamento.

Tabela 4.4 – Comparação entre as velocidades de montante do ressalto hidráulico calculadas por Teixeira (2008) e obtidas em simulação.

| Escala | V_1 [m/s] | | Diferença (%) |
|--------|-----------------|----------|---------------|
| | Teixeira (2008) | Simulado | |
| 1:1 | 17,69 | 18,39 | 3,95 |
| 1:32 | 17,51 | 18,05 | 3,03 |
| 1:50 | 18,04 | 17,08 | 5,31 |
| 1:100 | 17,78 | 17,31 | 2,63 |

Percebe-se, portanto, que ambas metodologias convergem para resultados próximos, apresentando variações de 2,6% a 5,3% entre as diferentes escalas. Todavia, embora haja a convergência entre as metodologias apresentadas, deve-se ressaltar que ambos resultados carecem de comparação com dados de velocidade medidos diretamente na posição de início do ressalto hidráulico, a qual permitiria uma comparação mais fidedigna dos resultados calculados e/ou simulados com resultados medidos.

4.6 CONCLUSÕES

O estudo ora exposto apresentou uma comparação entre resultados obtidos através de simulações com CFD com equações empíricas consolidadas e resultados medidos em modelos físicos hidráulicos para três diferentes escalas (1:32, 1:50 e 1:100) e para escala de protótipo (1:1). Foi utilizada uma metodologia de cálculo para escoamento permanente no pacote Ansys CFX, o qual utiliza-se das equações RANS e da continuidade como modelos matemáticos. Foi utilizado o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ para a modelagem da turbulência e o método VOF para a modelagem da interface água-ar.

Foram realizadas comparações entre os resultados obtidos nas simulações com variáveis medidas experimentalmente (pressões médias no fundo da bacia de dissipação e perfil da linha d'água) e variáveis calculadas indiretamente ou por equações empíricas (alturas conjugadas, posição de início do ressalto, comprimento do rolo e análise das velocidades).

A partir dos resultados obtidos nas simulações para as quatro diferentes escalas, observa-se, em linhas gerais, que simulações em CFD apresentam-se como uma ferramenta de grande utilidade para determinar a magnitude das variáveis apresentadas, podendo ser utilizadas a nível de projeto de engenharia para dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico. Ainda, destaca-se o fato de as simulações computacionais proporcionarem a extração de resultados das variáveis simuladas em qualquer ponto do domínio de simulação, seja por resultados extraídos diretamente em qualquer ponto discretizado ou por interpolação entre os mesmos.

Nota-se que os resultados das simulações para as variáveis localizadas em posições próximas ao início do ressalto, região onde foi verificada dificuldade da

representação da aeração do escoamento com o método VOF, apresentaram variações mais discrepantes em comparação aos valores medidos experimentalmente ou obtidos a partir de equações empíricas. Por outro lado, também deve ser levado em consideração que as medições em modelos físicos hidráulicos nessa região também são dificultadas devido à alta aeração e turbulência do escoamento. Além das incertezas oriundas da grande característica bifásica do escoamento nas posições iniciais do ressalto, deve-se ressaltar que essa região é marcada por escoamentos altamente turbulentos e de difícil descrição.

Não foram verificadas diferenças expressivas entre as escalas simuladas, com exceção à variável de posição de início do ressalto afogado para a simulação em escala 1:100. Todavia, deve-se destacar que os resultados de pressões médias no fundo da bacia de dissipação nas escalas 1:32 e 1:50 são superiores aos observados em escala 1:1, verificando a existência do efeito de escala também na modelagem computacional, além dos efeitos de escala com relação a esta variável apresentados por Teixeira (2008).

Sugere-se, em trabalhos futuros, realizar simulações para diferentes condições computacionais, tal como para diferentes modelos de turbulência e diferentes abordagens para a modelagem multifásica da interface água-ar. Ainda, sugere-se realizar comparações das soluções apresentadas com soluções obtidas em outros softwares e solvers, tal como o pacote de código aberto OpenFOAM. Sobretudo, a fim de aprofundar as análises apresentadas, sugere-se realizar simulações para outras vazões e condições de escoamento e submergência apresentados por Teixeira (2008), comparando seus resultados aos dados experimentais coletados. Uma maior gama de vazões simuladas possibilitará uma complementação dos dados apresentados, solidificando as comparações realizadas.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, A. M. et al. Characteristics of B-Jump with Different Toe Locations. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 8, p. 938–948, ago. 1993.

AMORIM, J. C. C.; AMANTE, R. C. R.; BARBOSA, V. D. **Experimental and numerical modeling of flow in a stilling basin**. Proceedings of the 36th IAHR world congress 28 June–3 July, the Hague, Netherlands. 2015

AMORIM, J. C. C.; RODRIGUES, R. C.; MARQUES, M. G. A numerical and

experimental study of hydraulic jump stilling basin. In: **Advances in Hydroscience and Engineering**. v. 4. 2004.

ANSYS. **ANSYS CFX - Solver Theory Guide**. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2009.

BAILLY, C.; COMTE-BELLOT, G. **Turbulence**. Cham: Springer International Publishing, 2015.

BAYON-BARRACHINA, A.; LOPEZ-JIMENEZ, P. A. Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 4, p. 662–678, 1 jul. 2015

BAYON, A. et al. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. **Environmental Modelling & Software**, v. 80, p. 322–335, jun. 2016.

CAROLLO, F. G.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. Sequent Depth Ratio of a B-Jump. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 6, p. 651–658, jun. 2011.

CAROLLO, F. G.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. New Expression of the Hydraulic Jump Roller Length. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 11, p. 995–999, nov. 2012.

CARVALHO, E. O Vertedouro de Porto Colômbia - Desempenho e Recuperação da Bacia de Dissipação. In: **Grandes Vertedouros Brasileiros**. [s.l.] Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), 2010. p. 129–138.

CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 2008.

CHANSON, H. Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 3, p. 159–163, 2009a.

CHANSON, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. **European Journal of Mechanics, B/Fluids**, v. 28, n. 2, p. 191–210, 2009b.

CHANSON, H. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 9, n. 2, p. 125–142, 2009c.

DAI PRÁ, M. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

- DAI PRÁ, M. et al. Pressões Médias e Flutuantes Devidas ao Escoamento em uma Curva de Concordância Vertical entre Vertedouro e Canal Horizontal - Estudo Experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 197–207, 2012.
- DE PADOVA, D.; MOSSA, M. Hydraulic Jump: A Brief History and Research Challenges. **Water**, v. 13, n. 13, p. 1733, 23 jun. 2021.
- HAGER, W. H. B-jump in sloping channel. **Journal of Hydraulic Research**, v. 26, n. 5, p. 539–558, out. 1988.
- HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 8
- HAGER, W. H.; BREMEN, R. Classical hydraulic jump: sequent depths. **Journal of Hydraulic Research**, v. 27, n. 5, p. 565–585, set. 1989.
- HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N. Classical hydraulic jump: length of roller. **Journal of Hydraulic Research**, v. 28, n. 5, p. 591–608, 19 set. 1990.
- HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011.
- HIRT, C. .; NICHOLS, B. . Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981.
- HOHERMUTH, B.; BOES, R. M.; FELDER, S. High-Velocity Air–Water Flow Measurements in a Prototype Tunnel Chute: Scaling of Void Fraction and Interfacial Velocity. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 147, n. 11, p. 1–11, nov. 2021.
- KAWAGOSHI, N.; HAGER, W. H. B-jump in sloping channel, II. **Journal of Hydraulic Research**, v. 28, n. 4, p. 461–480, 19 jul. 1990.
- LESIEUR, M. **Turbulence in Fluids**. Fourth Rev ed. [s.l.] Springer, 2008.
- LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 21, p. 43–51, out. 2018.
- MACIÁN-PÉREZ, J. F. et al. Experimental characterization of the hydraulic jump profile and velocity distribution in a stilling basin physical model. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 6, 2020b.
- MARQUES, M. G. et al. **PARALELO ENTRE O COEFICIENTE DE AERAÇÃO E A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO RESSALTO HIDRÁULICO: UM ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL**. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo: 2007

- MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.
- NÓBREGA, J. D.; SCHULZ, H. E.; ZHU, D. Z. **Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis and ultrasonic sensor measurements**. 5th International Symposium on Hydraulic Structures. Hydraulic structures and society - Engineering challenges and extremes. Brisbane, Australia: University of Queensland, 2014. Disponível em: <<http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:329760>>
- PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Denver, CO: United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1984.
- PFISTER, M.; CHANSON, H. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 2, p. 244–246, 2012.
- POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- RAJARATNAM, N. Submerged Hydraulic Jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 4, p. 71–96, jul. 1965a.
- RAJARATNAM, N. The Hydraulic Jump as a Well Jet. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 5, p. 107–132, 9 set. 1965b.
- RAJARATNAM, N. Hydraulic Jumps. In: **Advances in HYDROSCIENCE**. [s.l.] ACADEMIC PRESS INC., 1967. v. 4p. 197–280.
- ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 29, p. 123–160, 1997.
- RODRIGUES, R. C. **ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE BACIA DE DISSIPACÃO**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica—Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2002.
- TEIXEIRA, E. D. **Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- TEIXEIRA, E. D. et al. Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 87–100, 2012.
- TORRES, C. et al. Application of Three-Dimensional CFD VOF to Characterize Free-Surface Flow over Trapezoidal Labyrinth Weir and Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 147, n. 3, p. 1–19, mar. 2021.

VALERO, D.; BUNG, D. B.; CROOKSTON, B. M. Energy Dissipation of a Type III Basin under Design and Adverse Conditions for Stepped and Smooth Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 7, jul. 2018.

VAN ALWON, J. C. **Numerical Modelling of Aerated Flows Over Stepped Spillways**. Leeds, UK: University of Leeds, 2019.

WIEST, R. A. **Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Formado a Jusante de um Vertedouro com Diferentes Graus de Submergência**. Dissertação (Mestrado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

WIEST, R. A. et al. Start position of a sloping hydraulic jump. **RBRH**, v. 25, p. 1–9, 2020.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3rd. ed. La Cañada, CA: DCW Industries, 2006.

YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, jul. 1992.

YALIN, M. S. **Theory of Hydraulic Models**. London: Macmillan Education UK, 1971.

5 EFEITO DE ESCALA DAS PRESSÕES MÉDIAS NO FUNDO DE UMA BACIA DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO VIA ABORDAGEM COMPUTACIONAL

O presente trabalho busca atender os objetivos específicos (iii) e (iv) apresentados no capítulo introdutório. Assim, o presente trabalho tem como objetivos apresentar a metodologia de simulações em CFD com fluidos hipotéticos, apresentar os resultados obtidos nessas simulações e compará-los aos resultados de simulações utilizando água como fluido principal da simulação.

5.1 RESUMO

O efeito de escala é um fenômeno inerente aos modelos físicos hidráulicos quando utilizado nos modelos os mesmos fluidos que são observados no protótipo. As simulações com CFD apresentam-se como uma abordagem interessante para estudos de fenômenos hidráulicos, podendo-se incluir neste contexto, os efeitos de escala. Enquanto nos modelos físicos hidráulicos há uma limitação quanto aos fluidos possíveis de serem utilizados nas corridas experimentais, computacionalmente pode-se alterar propriedades físicas dos fluidos simulados, criando fluidos hipotéticos. O presente estudo tem como objetivo investigar o efeito de escala nas pressões médias no fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, através de uma abordagem computacional, utilizando o conceito de fluidos hipotéticos. Os fluidos hipotéticos utilizados terão sua viscosidade e tensão superficial variadas, de maneira isolada e concomitante, a fim de atender nas simulações em escala de modelo os critérios de semelhança de Reynolds e Weber, além do critério de Froude, já atendido. As simulações foram realizadas no através do solver Ansys CFX a partir de uma abordagem RANS, utilizando o modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$. A modelagem da interface fluido-ar foi realizada através do método VOF. Foi observado que a representação dos efeitos viscosos nos modelos com a mesma magnitude destes em escala de protótipo, através da alteração da viscosidade do fluido principal utilizado na simulação e garantindo a igualdade dos números de Reynolds entre modelo e protótipo, possuem grande influência na prevenção do efeito de escala para as pressões médias.

5.2 INTRODUÇÃO

A construção, instrumentação e análise de escoamentos em modelos físicos hidráulicos é, provavelmente, uma das ferramentas mais antigas presentes na engenharia hidráulica (PFISTER; CHANSON, 2012), sendo de grande utilidade para a definição de soluções técnicas e econômicas para problemas investigados (HELLER, 2011). Esses modelos consistem em uma representação da estrutura física a ser modelada em uma escala geométrica diferente da original (protótipo), podendo ser maiores, menores, ou até distorcidos em alguma dimensão em relação a outra (NOVAK et al., 2010; YALIN, 1971). Na avaliação de modelos físicos hidráulicos de estruturas de dissipação de energia, comumente são encontrados modelos reduzidos e sem distorção, onde a estrutura, ou parte dela, é reduzida em relação ao protótipo através de uma escala geométrica, definida por $\lambda_L = L_M/L_P$, onde L é uma medida qualquer com dimensões de comprimento e os índices M e P referem-se a essa medida em escala de modelo e de protótipo, respectivamente. Assim, a relação $0 < \lambda_L < 1$ é comumente observada em modelos físicos hidráulicos de estruturas de dissipação de energia.

Para garantir que as medições realizadas em um modelo físicos sejam representativas dos fenômenos que ocorre no protótipo, devem ser atendidos critérios de semelhança. Esses critérios são representados através de proporções constantes adimensionais e quando as mesmas são respeitadas entre o modelo e o protótipo, pode-se dizer que o modelo possui semelhança, parcial ou completa, com o protótipo (HELLER, 2011; NOVAK et al., 2010; YALIN, 1971). A semelhança completa entre modelo e protótipo é garantida quando as semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica são respeitadas. As definições dessas tipologias de semelhança podem ser encontradas em bibliografias clássicas relacionadas a modelos físicos hidráulicos (NOVAK et al., 2010; YALIN, 1971).

Uma maneira de agrupar as variáveis a serem medidas nos modelos físicos hidráulicos, reduzindo o número de variáveis a serem analisadas durante a experimentação e, por consequência, os custos relacionados à modelagem física, é a utilização da análise dimensional (WHITE, 2018). No estudo de ressaltos hidráulicos, após a realização da análise dimensional através do Teorema dos Termos π de Buckingham, comumente encontram-se alguns parâmetros adimensionais recorrentes na engenharia hidráulica, a depender das variáveis de base utilizadas.

Dentre estes parâmetros pode-se destacar o Número de Froude ($Fr = V_1/\sqrt{g h_1}$), o Número de Reynolds ($Re = h_1 V_1 / \nu$) e o Número de Weber ($We = \rho V_1^2 h_1 / \sigma$). Afirmar que há semelhança entre modelo e protótipo, é respeitar a igualdade de parâmetros adimensionais entre os mesmos, ou seja, $\pi_M = \pi_P$, sendo π um parâmetro adimensional qualquer.

Um dos grandes problemas relacionados à modelagem física de fenômenos hidráulicos é o efeito de escala, o qual decorre da utilização dos mesmos fluidos observados no protótipo nos modelos físicos hidráulicos, onde os fluidos envolvidos comumente são água e ar. Com isso, prioriza-se a preservação de determinado parâmetro adimensional em detrimento de outros. Nos modelos hidráulicos de superfície livre, como é o caso de ressaltos hidráulicos, a preservação do critério de semelhança de Froude apresenta grande importância (HELLER, 2011, 2017).

O efeito de escala pode ser definido como uma consequência da similaridade incompleta entre o modelo e o protótipo, um erro devido à escolha da preservação de uma lei de escala em detrimento de outras. A causa dessa não similaridade pode ser melhor definida como defeito de escala (NOVAK et al., 2010). Quanto maiores as diferenças na escala geométrica, mais acentuado é o efeito de escala. Ainda, a magnitude deste efeito depende do parâmetro a ser investigado no modelo, uma vez que a importância relativa das diferentes forças atuantes no modelo e no protótipo pode variar (HELLER, 2011; PFISTER; CHANSON, 2012).

Nota-se, portanto, que a ocorrência do efeito de escala é uma característica inerente dos modelos físicos ao utilizar em seus ensaios os mesmos fluidos observados no protótipo. Ao realizar análises a partir de modelos físicos deve-se ter ciência da magnitude deste efeito e a partir disso minimizá-lo. Heller (2011) sintetizou a busca pela redução do efeito escala em três grandes termos: evasão, compensação e correção.

A evasão consiste em limitar valores entre as relações adimensionais a serem respeitados nos modelos físicos hidráulicos. No caso de ressaltos hidráulicos, verificou-se a limitação do número de Reynolds do modelo em $Re_M > 10^5$ para a não ocorrência de efeitos de escala com relação às forças viscosas neste fenômeno (CHANSON, 2009b; HAGER; BREMEN, 1989). Com relação à incorporação de ar em ressaltos hidráulicos, Pfister e Chanson (2014) afirmam que o efeito de escala é mínimo quando $We^{0,5} > 140$. Sobretudo, são frequentes as apresentações de escalas

mínimas de modelos físicos hidráulicos com o intuito de evadir o efeito de escala. Teixeira et al. (2012) apresentaram critérios para a definição de escalas mínimas para a avaliação de pressões médias no fundo da bacia de dissipação de ressaltos hidráulicos submergidos em função do Número de Froude de montante do ressalto e da submergência.

Conforme as outras duas terminologias apresentadas por Heller (2011), a compensação é definida por permitir a distorção geométrica parcial dos modelos em um determinado quesito a fim de garantir outros critérios de similaridade, como é o caso da distorção geométrica das rugosidades de canais em favorecimento ao respeito de outras relações de forças mais importantes do escoamento. Por fim, o critério de correção traduz-se no uso de fatores de correção nas medições realizados nos modelos físicos hidráulicos, que possibilitem relacionar os resultados obtidos nos modelos com os resultados observados em protótipo de maneira direta.

As limitações apresentadas na modelagem física de fenômenos hidráulicos, tal como o efeito de escala ora apresentado, mostram que uma abordagem computacional para o estudo de ressaltos hidráulicos passa a ser um caminho futuro (CHANSON, 2009c, 2009b; DE PADOVA; MOSSA, 2021). Uma das grandes linhas de análise de ressaltos hidráulicos de maneira computacional é através da modelagem fluidodinâmica computacional (CFD). Todavia, a modelagem deste fenômeno através de CFD também possui grandes dificuldades, principalmente por se tratar de um fenômeno com características bifásicas e de alta turbulência.

Solucionar problemas dessa natureza computacionalmente exige uma elevada capacidade computacional, caso os produtos desejados na simulação tenham a ambição de representar todas as escalas espaciais e temporais de turbulência, além de solucionar a interface água-ar de maneira satisfatória. Devido a este fato, trabalhos de simulações computacionais de ressaltos hidráulicos por vezes se restringem a utilização das equações médias da continuidade e Navier-Stokes (RANS) como modelo matemático, a fim de reduzir os custos computacionais envolvidos (AMORIM; AMANTE; BARBOSA, 2015; AMORIM; RODRIGUES; MARQUES, 2004; BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015; BAYON et al., 2016; GHADERI et al., 2021; LONG; STEFFLER; RAJARATNAM, 1991; MA; HOU; PRINOS, 2001; MACIÁN-PÉREZ et al., 2020b; RODRIGUES, 2002; VALERO; BUNG; CROOKSTON, 2018). Até o momento da escrita deste trabalho, é do conhecimento dos autores do presente estudo apenas um trabalho que realizou uma simulação numérica direta (DNS), ou

seja, sem modelar nenhuma escala de turbulência, para um ressalto hidráulico (MORTAZAVI et al., 2016).

Ainda, os trabalhos que investigam o efeito de escala em estruturas hidráulicas a partir de uma abordagem computacional são escassos (TASSINARI, 2022; TASSINARI et al., 2018; TORRES et al., 2018) e não foram encontrados trabalhos que investigam este fenômeno para ressaltos hidráulicos ou bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico.

Conforme visto anteriormente, o efeito de escala se origina devido a impossibilidade de atender todos os critérios de semelhança quando utilizados os mesmos fluidos no modelo e no protótipo. Uma das liberdades que as simulações em CFD proporciona é a possibilidade de alterar as propriedades físicas dos fluidos simulados, conforme a necessidade do modelador. Assim, alterar as propriedades físicas dos fluidos utilizados na simulação, criando um fluido hipotético, possibilitaria garantir os critérios de semelhança desejados, garantindo que o modelo tenha semelhança dinâmica com o protótipo.

Portanto, o presente trabalho possui o objetivo de investigar o efeito de escala nas pressões médias observadas no fundo de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico através de simulações com CFD. Foram utilizados fluidos hipotéticos na simulação, os quais visam garantir, além da semelhança de Froude entre modelo e protótipo, comumente preservada em modelos físicos hidráulicos, os critérios de semelhança de Reynolds e Weber através da alteração das propriedades físicas dos fluidos simulados.

5.3 METODOLOGIA

A estrutura modelada computacionalmente corresponde ao protótipo e a modelos físicos hidráulicos do sistema extravasor de cheias da UHE Porto Colômbia, composto por um vertedouro de soleira controlada e bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico. Essa estrutura possui medições de pressões instantâneas no fundo da bacia de dissipação na escala de protótipo (1:1) e em modelos físicos hidráulicos em três diferentes escalas: 1:32, 1:50 e 1:100. O fato de possuir dados medidos em quatro escalas distintas, incluindo medições em protótipo, colabora para o estudo do efeito de escala. A investigação do efeito de escala com relação à pressões médias nas estruturas físicas já foi realizada por Teixeira (2008) e por

Teixeira et al. (2012), onde também podem ser encontrados detalhes sobre a instrumentação e descrição das estruturas.

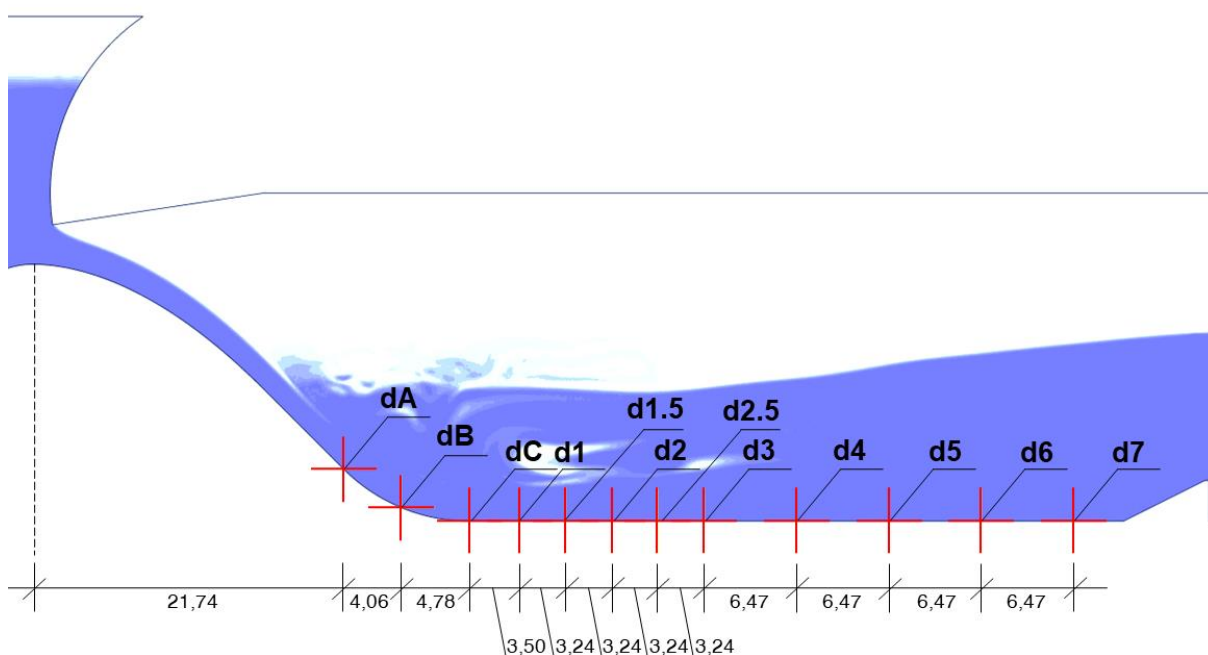
O ressalto hidráulico que ocorre na estrutura em estudo é um ressalto submerso, ou seja, ocorre o afogamento do mesmo, onde o nível d'água elevado a jusante faz com que o rolo do ressalto se desloque ao encontro da calha do vertedouro. Esse ressalto se enquadra na tipologia B proposta por Kindsvater (1944, apud HAGER, 1992), a qual é caracterizada por possuir início ainda na calha inclinada no vertedouro e término no trecho plano da bacia de dissipação. O ressalto observado nas estruturas físicas possui um número de Froude de montante na ordem de 5,2.

A comparação dos resultados medidos nos modelos físicos com simulações com CFD para essas estruturas foi realizada pelo autor da presente dissertação¹, onde foram validados os dados simulados de pressões médias no fundo da bacia de dissipação.

Na Figura 5.1 pode-se visualizar a região de análise das pressões médias, bem como as posições das sondas onde foram realizadas as medições de pressão apresentadas por Teixeira (2008) e Teixeira et al. (2012). Ressalta-se que os resultados apresentados pelos autores consideraram a posição do pé do ressalto hidráulico como origem. Todavia, no presente estudo, utilizou-se como origem a crista do vertedouro.

¹ A ordem de publicação dos artigos presentes nesta dissertação ocorrerá na ordem que os mesmos estão sendo apresentados, onde o segundo artigo será submetido apenas após a publicação do primeiro. Assim, na redação final do segundo artigo para a sua submissão, neste trecho será referenciado o primeiro artigo publicado.

Figura 5.1 – Posições das medições realizadas nos modelos físicos hidráulicos e no protótipo.



Obs.: Nos modelos em escala 1:50 e 1:100 não foram realizadas medições nas posições das sondas d1.5 e d2.5. No protótipo não foram realizadas medições nas posições das sondas, d1.5, d2, d2.5, d4 e d6.

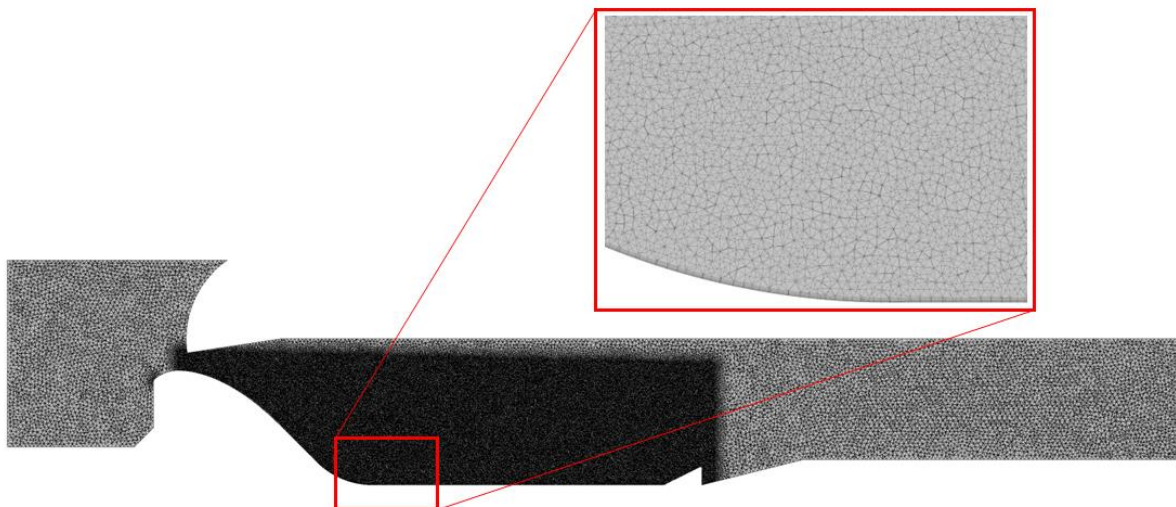
5.3.1 Características da Modelagem Computacional

As simulações foram realizadas através do solver Ansys CFX. O domínio computacional e a malha das simulações foram gerados a partir dos softwares Ansys DesignModeler e Ansys Meshing, respectivamente.

A malha utilizada possui característica piramidal triangular, com um esquema de inflação de malha a partir da calha do vertedouro e um refinamento de malha na região de ocorrência do ressalto hidráulico. Os elementos na região refinada possuem dimensões características de 0,16 m, em escala de protótipo, e adaptados através da escala geométrica conforme a escala da simulação desejada. A partir da validação da malha, executada com base no método do GCI, proposto por Roache (1997) e sistematizado por Celik et al. (2008) definiu-se utilizar uma malha com aproximadamente de $3,0 \times 10^6$ elementos, resultando em uma incerteza média decorrente do detalhamento da malha iguais a 3,7 %, 2,8 %, 3,2 % e 5,5 % nos resultados de pressão média para as escalas 1:1, 1:32, 1:50 e 1:100, respectivamente.

Na Figura 5.2 podem ser observados o domínio de simulação e a malha utilizada.

Figura 5.2 – Domínio de simulação e malha utilizada.



O modelo matemático utilizado pelo Ansys CFX são as equações médias da continuidade e as equações RANS, onde as mesmas são solucionadas numericamente a partir do método dos volumes finitos. Foi utilizada uma solução de regime permanente, onde seu avanço temporal é realizado por um falso passo de tempo, até que os critérios mínimos de residuais adotados ou o número máximo de iterações seja atingido (ANSYS, 2009).

Foram adotadas as seguintes condições de contorno para as simulações: na entrada adotou-se uma condição de vazão mássica, a montante, correspondente a uma vazão de água de 4.000 m³/s (em escala de protótipo); na saída foi adotada uma condição de contorno com nível d'água constante com pressão hidrostática; condições de parede admitindo não deslizamento em regiões onde não ocorrem trocas de massa; condições de simetria nas áreas laterais do domínio e; condições de abertura na parte superior.

Foi utilizado o método VOF (HIRT; NICHOLS, 1981) para a modelagem da interface água-ar, o qual já se encontra implementado no Ansys CFX. A modelagem da turbulência foi realizada com o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$ (YAKHOT et al., 1992), o qual depende de menos constantes empíricas quando comparado ao modelo $\kappa - \varepsilon$ tradicional (AMORIM; AMANTE; BARBOSA, 2015). O modelo de turbulência utilizado, bem como método VOF para a modelagem da interface fluido-ar demonstraram capacidade para a modelagem com CFD de ressaltos hidráulicos baseadas em RANS (BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015; BAYON et al., 2016; MACIÁN-PÉREZ et al., 2020b; VALERO; BUNG; CROOKSTON, 2018).

5.3.2 Modelagem Utilizando Fluidos Hipotéticos

Conforme mencionado anteriormente, os modelos físicos hidráulicos que representam escoamentos a superfície livre frequentemente preservam o critério de semelhança de Froude (HELLER, 2011, 2017), enquanto é admitida relaxação em outros critérios. Levando em consideração o número de Froude (Equação 5.1), seu critério de semelhança ($Fr_M = Fr_P$) e um modelo com escala geométrica λ_L , pode-se definir uma escala de velocidades (λ_V) em função da escala geométrica (Equação 5.2). Nos modelos de semelhança de Froude sem distorções entre suas dimensões, a partir da escala de velocidades, pode-se também definir uma escala de vazões (λ_Q), representada na Equação 5.3, a qual é utilizada para definir os balanços de massa em modelos físicos hidráulicos de Froude.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g L}} \quad (5.1)$$

$$\lambda_V = \frac{V_M}{V_P} = \lambda_L^{1/2} \quad (5.2)$$

$$\lambda_Q = \frac{Q_M}{Q_P} = \lambda_L^{5/2} \quad (5.3)$$

Onde V é uma variável de velocidade; g é a aceleração gravitacional, adotada como constante conforme a aceleração gravitacional da terra; L é uma variável de comprimento e; Q é uma variável de vazão.

A partir de uma metodologia análoga, pode-se também definir uma escala de viscosidade cinemática (λ_ν) a partir do critério de semelhança de Reynolds, utilizando a mesma escala de velocidades obtida através da preservação do critério de semelhança de Froude. Atendendo essa igualdade, satisfaz-se a semelhança entre as forças viscosas entre modelo e protótipo. A Equação 5.4 apresenta o número de Reynolds e a Equação 5.5 a escala de viscosidade cinemática.

$$Re = \frac{V L}{\nu} \quad (5.4)$$

$$\lambda_\nu = \frac{\nu_M}{\nu_P} = \lambda_L^{3/2} \quad (5.5)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática.

Por fim, a mesma análise pode ser realizada a partir do número de Weber (Equação 5.6), também preservando a escala de velocidades obtida através da semelhança de Froude, para a definição de uma escala de tensão superficial (λ_σ),

apresentada na Equação 5.7, admitindo-se que a massa específica dos fluidos em escala de modelo e protótipo é a mesma.

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (5.6)$$

$$\lambda_\sigma = \frac{\sigma_M}{\sigma_P} = \lambda_L^2 \quad (5.7)$$

Onde σ é a tensão superficial entre os fluidos ensaiados, no caso, água e ar ou fluido hipotético e ar.

Assim, com as escalas de viscosidade cinemática e tensão superficial definidas nas equações 5.5 e 5.7, respectivamente, é possível definir a magnitude dessas propriedades para fluidos em escala de modelo de forma que satisfaçam, além do critério de semelhança de Froude primeiramente fixado, os critérios de semelhança de Reynolds e Weber concomitantemente. Portanto, para cada escala de modelo podem ser definidos fluidos com essas características distintas, a fim de garantir a semelhança dinâmica entre modelo e protótipo.

A investigação também foi realizada para o número de Euler ($Eu = \Delta P / \rho V^2$), que poderia ser utilizado para definir uma escala de variação de pressão. Todavia, optou-se por manter a massa específica inalterada entre os fluidos de modelo e protótipo, ou seja, a escala de massa específica resulta em $\lambda_\rho = \rho_M / \rho_P = 1$. Assim, ao atender o critério de semelhança de Froude, atende-se também o critério de semelhança de Euler (TASSINARI, 2022).

A metodologia supracitada define a base teórica para a atribuição dos fluidos hipotéticos. Cada fluido hipotético utilizado em escala de modelo atende um ou ambos critérios de semelhança de Reynolds e Weber. Conforme exposto acima, foram realizadas simulações para escala de protótipo e para três escalas de modelo, sendo elas 1:32, 1:50 e 1:100. Assim, foram utilizados 10 diferentes fluidos principais nas simulações, sendo um deles correspondente à água a 25°C, onde sua massa específica equivale à 997 kg/m³, e os outros três diferentes fluidos hipotéticos para cada uma das três escalas. A Tabela 5.1 apresenta os fluidos utilizados na simulação, indicando suas propriedades físicas de viscosidade cinemática e tensão superficial, escala geométrica do modelo e nomenclatura do fluido, de maneira a indexar os resultados apresentados na sequência.

Tabela 5.1 – Características dos fluidos utilizados nas simulações.

| Nomenclatura da Simulação | λ_L^{-1} | Fluido Utilizado ¹ | Crítérios de Semelhança Atendidos | ν [m ² /s] | $\sigma_{fluido-ar}$ [N/m] |
|---------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1_F | 1 | A | - | $8,90 \times 10^{-7}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 32_F | 32 | A | Fr | $8,90 \times 10^{-7}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 32_FR | 32 | H | Fr, Re | $4,92 \times 10^{-9}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 32_FW | 32 | H | Fr, We | $8,90 \times 10^{-7}$ | $7,06 \times 10^{-5}$ |
| 32_FRW | 32 | H | Fr, Re, We | $4,92 \times 10^{-9}$ | $7,06 \times 10^{-5}$ |
| 50_F | 50 | A | Fr | $8,90 \times 10^{-7}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 50_FR | 50 | H | Fr, Re | $2,52 \times 10^{-9}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 50_FW | 50 | H | Fr, We | $8,90 \times 10^{-7}$ | $2,89 \times 10^{-5}$ |
| 50_FRW | 50 | H | Fr, Re, We | $2,52 \times 10^{-9}$ | $2,89 \times 10^{-5}$ |
| 100_F | 100 | A | Fr | $8,90 \times 10^{-7}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 100_FR | 100 | H | Fr, Re | $8,90 \times 10^{-10}$ | $7,23 \times 10^{-2}$ |
| 100_FW | 100 | H | Fr, We | $8,90 \times 10^{-7}$ | $7,23 \times 10^{-6}$ |
| 100_FRW | 100 | H | Fr, Re, We | $8,90 \times 10^{-10}$ | $7,23 \times 10^{-6}$ |

¹Caracterização do fluido principal como água (A) ou hipotético (H).

Foram extraídos resultados de pressão média ao longo da calha do vertedouro e no fundo da bacia de dissipação para as 13 condições simuladas, caracterizadas pelo tipo de fluido utilizado na simulação

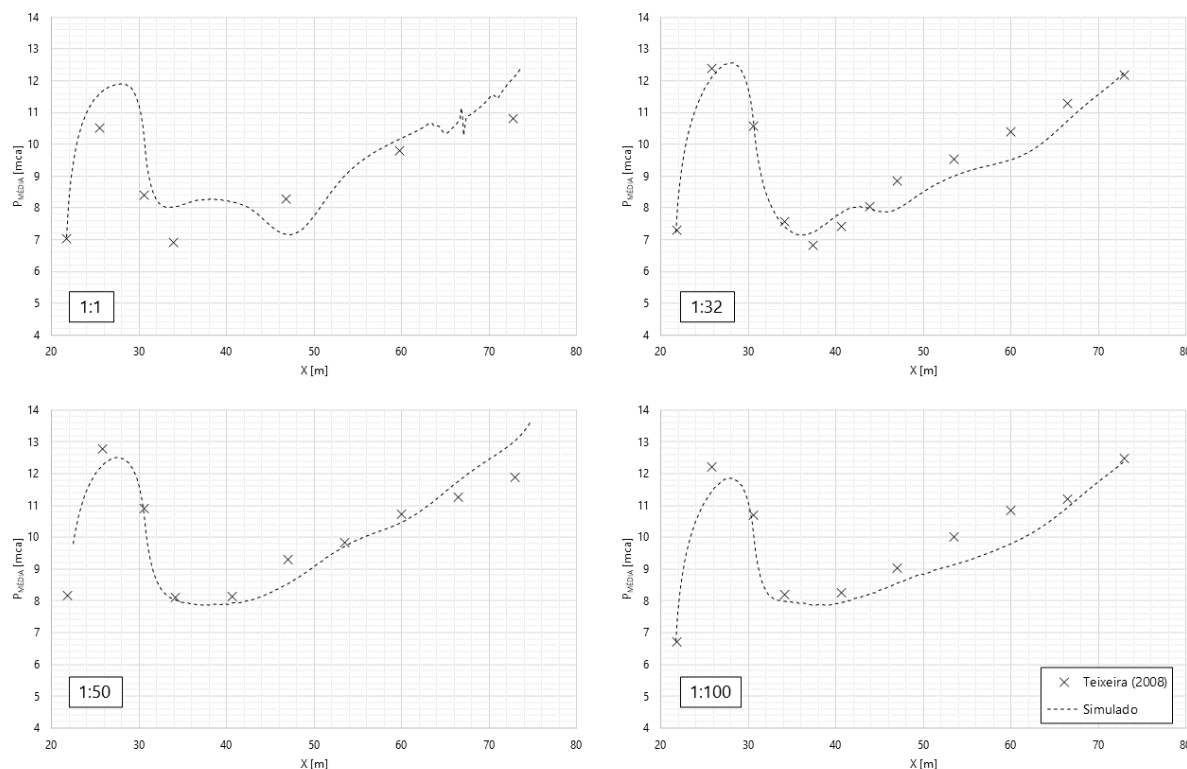
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, em um primeiro momento serão apresentados os resultados para as simulações onde foi utilizado água como fluido principal. Na sequência serão apresentados os resultados das simulações onde foram utilizados fluidos hipotéticos.

5.4.1 Simulações Utilizando Água como Fluido Principal

Uma primeira análise a ser realizada é visualização das pressões médias obtidas utilizando água a 25°C como fluido principal, ou seja, atendendo apenas o critério de semelhança de Froude, tal como observado nos modelos físicos hidráulicos e no protótipo. Os resultados das simulações foram comparados com os resultados apresentados por Teixeira (2008), medidos para as mesmas escalas e condições simuladas. A Figura 5.3 apresenta essa comparação.

Figura 5.3 – Comparação dos dados de pressão média medidos nos modelos físicos hidráulicos (TEIXEIRA, 2008) com os resultados das simulações utilizando água a 25°C como fluido principal.

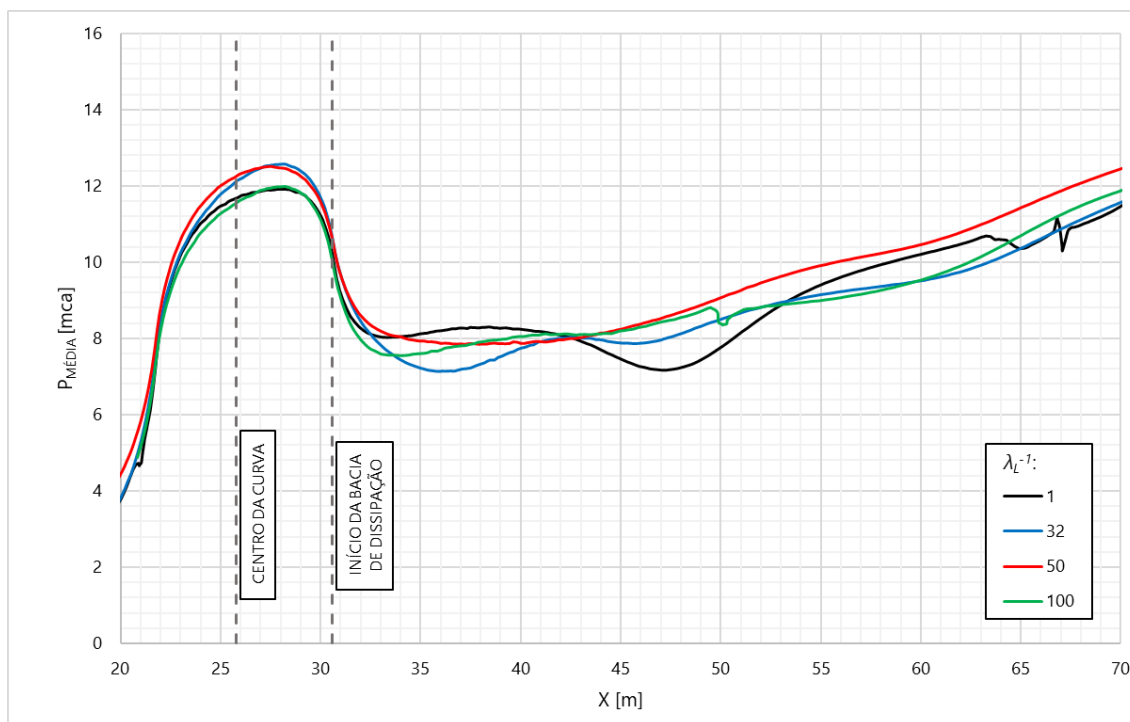


Os resultados obtidos nas simulações representam de maneira satisfatória as pressões médias, apresentando um erro médio em comparação com as sondas de 11,2%, 4,0%, 3,9% e 5,9% para as escalas de 1:1, 1:32, 1:50 e 1:100, respectivamente. Nota-se que a simulação em escala de protótipo superestimou os valores medidos de pressão média em seis das sete sondas.

Em modelos físicos reduzidos relativos a ressaltos hidráulicos submersos, espera-se que as pressões médias nos modelos sejam maiores que as observadas em protótipo. Ainda, quanto menor a escala do modelo, menor é a incorporação de ar no escoamento. Devido a maior entrada de ar em modelos de maiores escalas, ocorre um aumento da linha d'água, mas sem alterar a pressão no fundo da bacia de dissipação, uma vez que o volume de água sobre esse ponto de medição permanece o mesmo (TEIXEIRA et al., 2012).

Essa informação pode ser melhor visualizada agrupando os resultados obtidos nessas condições de simulação em um mesmo gráfico, conforme apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Resultados das simulações utilizando água como fluido principal para as três escalas de modelo e para o protótipo.



Observa-se que na região da curva de concordância os resultados obtidos para o modelo em escala 1:100 é o modelo que mais se aproxima dos resultados de protótipo. Este fato gera estranheza em comparação aos resultados das simulações para outras escalas de modelo, visto que os resultados para essa escala deveriam divergir mais dos resultados apresentados em protótipo quando comparados às maiores escalas.

Entretanto, deve-se observar que os resultados da simulação em escala 1:1 superestimaram os valores medidos experimentalmente, ao passo que os resultados da simulação em escala 1:100 subestimam os dados experimentais, conforme pode ser observado na Figura 5.3. Assim, embora os resultados medidos nas estruturas físicas relativas à UHE Porto Colômbia apresentem a existência clara do efeito de escala (TEIXEIRA et al., 2012), este efeito é atenuado pela superestimação das pressões médias na simulação em escala 1:1 em concomitância à subestimação dessa variável na simulação em escala 1:100.

Os resultados dos modelos em escala 1:32 e 1:50 apresentaram valores próximos entre si para a região da curva, fato coerente, visto que estes são os modelos mais próximos em dimensões geométricas.

Conforme apresentado anteriormente, sabe-se que a escala do modelo físico hidráulico possui influência sobre a incorporação de ar no escoamento, sendo que quanto menor a escala do modelo, menor é a incorporação de ar (TEIXEIRA et al., 2012). Dessa maneira, supõe-se que este fato se estenda também às simulações computacionais, ou seja, que a escala da simulação apresenta influência sobre os métodos utilizados para a modelagem multifásica. Assim, mostra-se a necessidade de um estudo específico sobre este fenômeno no sistema simulado, avaliando, também, outros métodos de modelagem da interface fluido-ar, além do método VOF utilizado no presente estudo.

Em regiões posteriores ao início da bacia de dissipação notam-se maiores oscilações nos valores de pressão média nas simulações em escala protótipo, apresentados valores, em determinadas regiões, maiores que os resultados obtidos em escala de modelo. Também se notam resultados inferiores para o modelo em escala 1:100 em algumas regiões quando comparado ao modelo em escala 1:50.

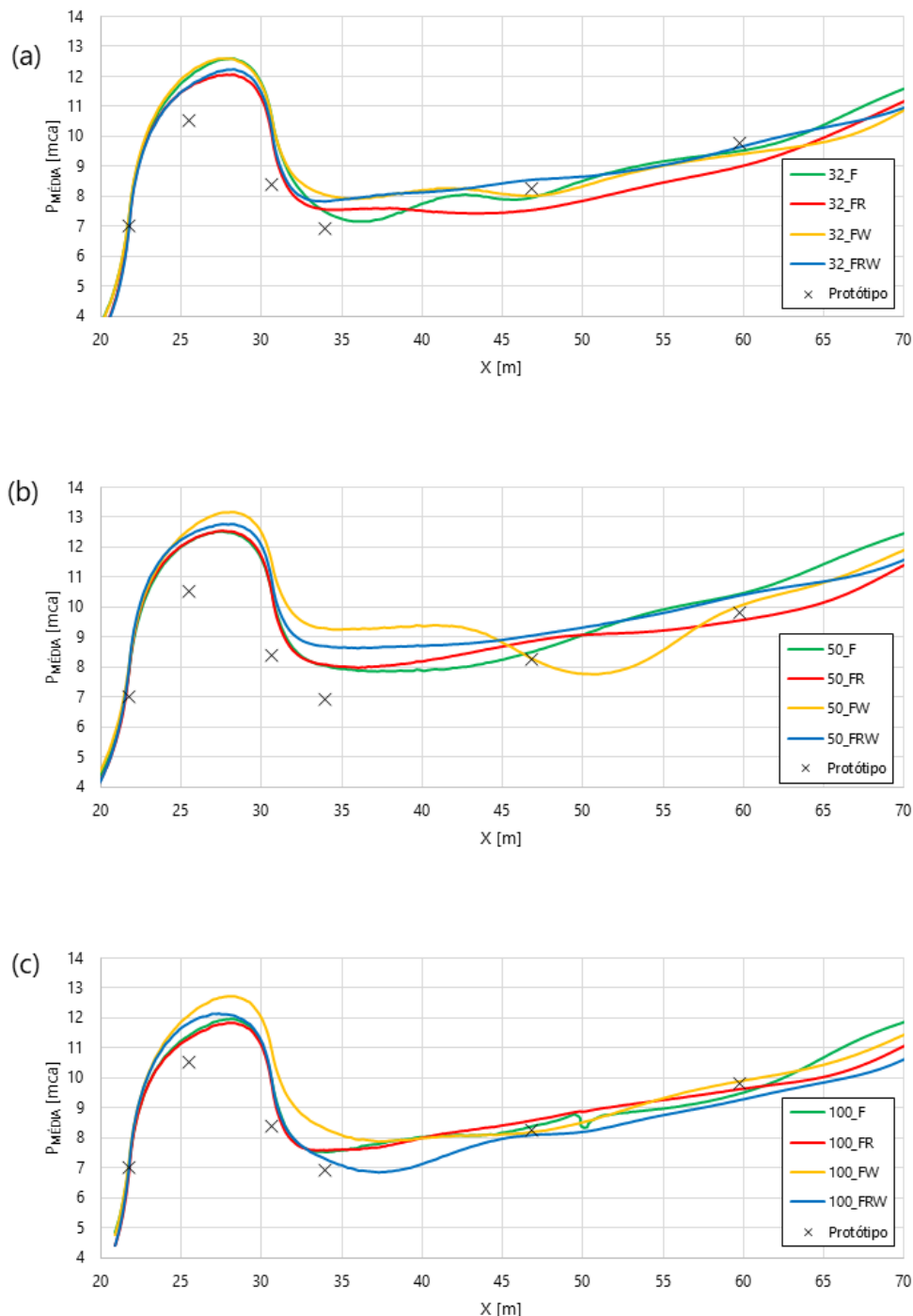
Rajaratnam (1965a) afirma que a pressão média observada no fundo de ressaltos hidráulicos submergidos pode ser razoavelmente considerada hidrostática. Contudo, deve-se levar em consideração que o autor desenvolveu seu estudo baseado em experimentos de ressaltos hidráulicos afogados desenvolvidos a jusante de uma comporta plana. No presente caso nota-se uma tendência de aumento gradual das pressões médias ao longo da bacia de dissipação, acompanhando a linha d'água do ressalto observado nas simulações, indo ao encontro à observação apontada por Rajaratnam (1965a).

5.4.2 Simulações Utilizando Fluidos Hipotéticos

Nesse item serão apresentados os resultados das simulações utilizando fluidos hipotéticos os quais tiveram sua viscosidade cinemática alterada, a fim de garantir o critério de semelhança de Reynolds, sua tensão superficial alterada, a fim de garantir o critério de semelhança de Weber, e ambas as propriedades físicas alteradas a fim de garantir ambos critérios.

Na Figura 5.5 são apresentados os resultados de pressão média obtidos na calha do vertedouro e no fundo da bacia de dissipação para as simulações nas três escalas de modelo em estudo (1:32, 1:50 e 1:100) utilizando água e fluidos hipotéticos como fluido principal, em comparação com o resultado medido em escala de protótipo.

Figura 5.5 – Resultados das simulações utilizando fluidos hipotéticos e comparação com dados medidos em escala de protótipo (TEIXEIRA, 2008). Em (a), simulações em escala 1:32; em (b) escala 1:50 e; em (c) escala 1:100.



F = Froude; FR = Froude e Reynolds; FW = Froude e Weber e; FRW = Froude, Reynolds e Weber.

A partir dos resultados apresentados na Figura 5.5, pode-se realizar uma análise do erro percentual relativo entre as pressões médias obtidas em simulação com as pressões médias medidas na estrutura física em escala de protótipo. Na

Tabela 5.2 é apresentada essa análise, além das médias dos erros para cada fluido simulado.

Tabela 5.2 – Erros percentuais relativos entre os resultados das simulações e os dados medidos em protótipo (TEIXEIRA, 2008).

| Sonda | X [m] | $ P_{Méd,Sim} - P_{Méd,Prot.} / P_{Méd,Prot.} [\%]$ | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|--|------------|------------|------------|-----------------------|------------|-------------|------------|------------------------|------------|------------|------------|
| | | $\lambda_L^{-1} = 32$ | | | | $\lambda_L^{-1} = 50$ | | | | $\lambda_L^{-1} = 100$ | | | |
| | | F | FR | FW | FRW | F | FR | FW | FRW | F | FR | FW | FRW |
| dA | 21,8 | 2,9 | 1,4 | 4,0 | 2,6 | 11,3 | 10,6 | 14,3 | 12,9 | 0,9 | 3,4 | 2,4 | 1,0 |
| dB | 25,8 | 4,0 | 0,8 | 5,2 | 1,1 | 5,2 | 5,4 | 9,2 | 7,1 | 1,0 | 2,2 | 4,8 | 2,1 |
| dC | 30,6 | 6,5 | 0,8 | 6,5 | 2,5 | 5,2 | 5,1 | 15,1 | 9,3 | 0,3 | 2,0 | 9,1 | 0,4 |
| d1 | 34,1 | 7,6 | 6,2 | 0,0 | 2,8 | 0,2 | 0,2 | 15,5 | 7,9 | 6,2 | 5,8 | 2,8 | 9,8 |
| d3 | 47,1 | 11,0 | 5,2 | 11,8 | 19,2 | 18,8 | 23,7 | 15,0 | 26,3 | 17,4 | 19,7 | 14,4 | 12,9 |
| d5 | 60,0 | 6,8 | 11,7 | 7,6 | 5,3 | 2,5 | 6,2 | 1,0 | 2,0 | 6,6 | 5,6 | 2,9 | 9,0 |
| d7 | 72,9 | 0,7 | 1,5 | 2,4 | 3,6 | 6,9 | 0,7 | 4,0 | 1,5 | 2,2 | 2,3 | 0,0 | 5,4 |
| Média | | 5,6 | 4,0 | 5,4 | 5,3 | 7,2 | 7,4 | 10,6 | 9,6 | 4,9 | 5,8 | 5,2 | 5,8 |

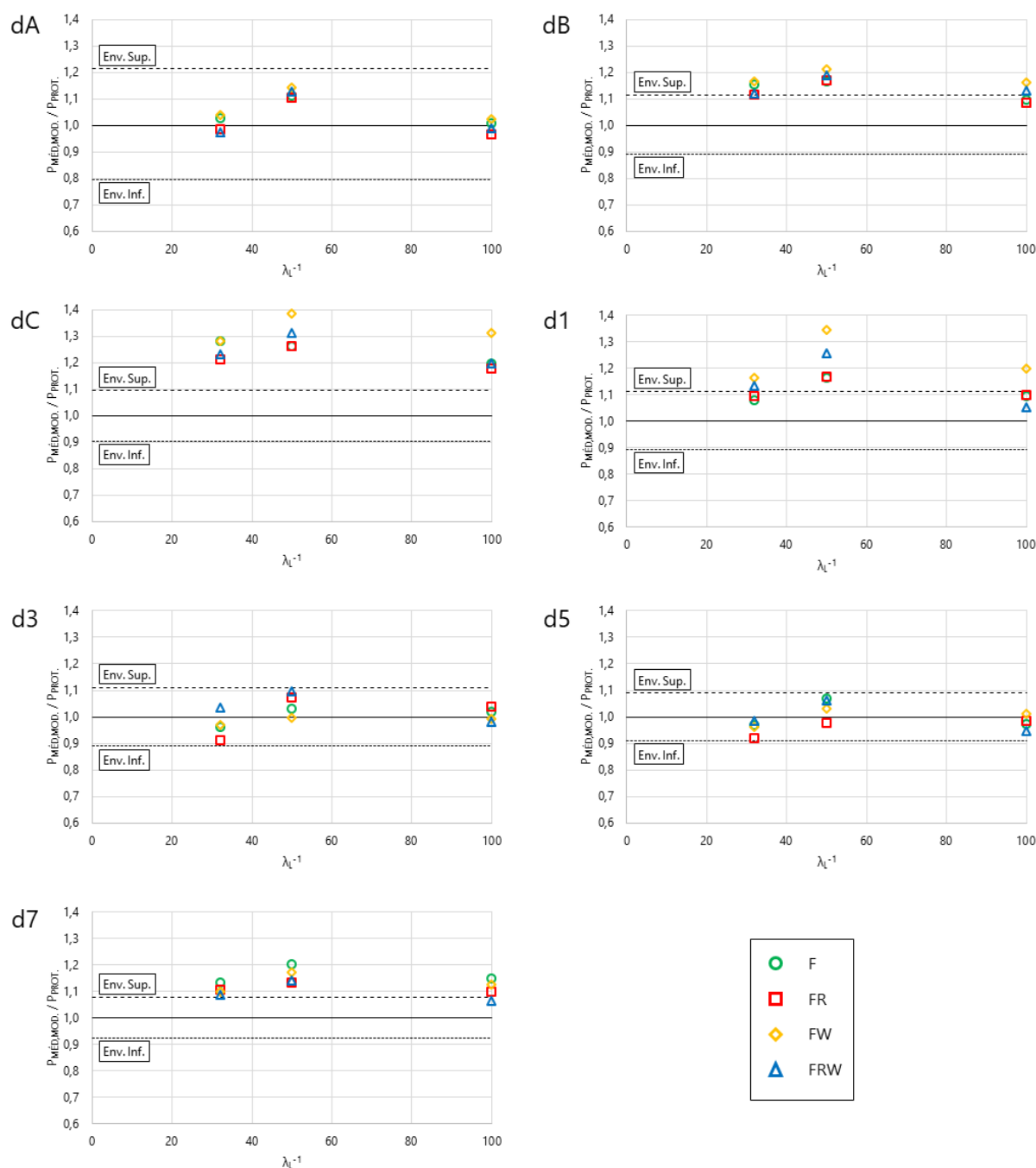
F = Froude; FR = Froude e Reynolds; FW = Froude e Weber e; FRW = Froude, Reynolds e Weber.

Em média observa-se que os fluidos de índice FR apresentam um melhor desempenho, apresentando os menores erros médios (5,74%), seguidos pelos fluidos de índice F (5,91%), FRW (6,89%) e FW (7,05%). Com relação às escalas das simulações, que impactam na definição das magnitudes de viscosidade e tensão superficial dos fluidos hipotéticos, não foi observada uma tendência de diminuição ou aumento dos erros médios, sendo observado um erro médio de 5,06% para a escala 1:32, 8,68% para a escala 1:50 e 5,44% para a escala 1:100. Outro fato a ser destacado é que embora os erros percentuais relativos médios sejam maiores do que a incerteza relacionada à malha utilizada, calculada pelo GCI, estes possuem a mesma ordem de grandeza.

Teixeira et al. (2012), em um estudo sobre o efeito de escala para a mesma estrutura a partir de dados dos modelos físicos hidráulicos, apresentaram envoltórias superiores e inferiores de dispersão dos dados, utilizando a distribuição de Student a um nível de significância de 95%, obtidas através dos dados do modelo físico em escala 1:32. Este modelo físico, para essa estrutura, é o que possui escala mais próxima a do protótipo, além de ser o modelo com maior número de sondas de medição de pressão.

Essas envoltórias foram publicadas na forma $P_{Méd.,Modelo}/P_{Méd.,Protótipo}$, onde se pode avaliar a variação dos resultados do modelo em relação ao protótipo. Na Figura 5.6 são apresentadas as envoltórias desenvolvidas por Teixeira et al. (2012) e as relações de pressão média obtidas nas simulações com os diferentes fluidos em função da escala dos mesmos. Os resultados da Figura 5.6 são apresentados conforme as posições das sondas de medição de pressão observadas nos modelos físicos, apresentadas na Figura 5.1.

Figura 5.6 – Relação entre as pressões médias em escala de modelo obtidas nas simulações com as pressões médias medidas no protótipo.



Fonte: dados de protótipo e envoltórias de Teixeira (2008).

Observa-se que na região da sonda localizada mais a montante (dA), próxima à porção mais elevada da curva de concordância, todos os resultados apresentam-se dentro da envoltória de dispersão natural dos dados elaborada por Teixeira et al. (2012). Contudo, deve-se levar em consideração que essa faixa se apresenta mais

branda que as demais, caracterizada por uma maior dispersão natural dos resultados medidos em modelo físico.

Nota-se que nas regiões de maior influência da concordância entre a calha do vertedouro e a bacia de dissipação (posições dA, dB, dC e d1) os pontos referentes aos fluidos de índice “FW” foram os que se mostraram mais distantes dos dados medidos no protótipo. Portanto, possivelmente ao modificar apenas a tensão superficial do fluido principal da simulação, a fim de garantir o critério de semelhança de Weber, são observados resultados mais discrepantes com relação aos observados na simulação em protótipo nessas regiões.

Outro fato a ser observado é que nas posições dB, dC, d1 e d7 vários pontos localizaram-se acima da envoltória superior. Essas quatro posições podem ser divididas em duas regiões de análise, sendo a primeira relativa ao início da bacia de dissipação (dB, dC e d1) e a segunda relativa ao final da bacia de dissipação (d7).

Na primeira região apenas 9 dos 36 pontos localizaram-se no interior da envoltória de dispersão, sendo que destes 9, 4 referem-se a fluidos de índice “FR”, mostrando que a alteração da viscosidade do fluido, a fim de atender o critério de semelhança de Reynolds nas simulações em escala de modelo, apresenta-se como uma estratégia interessante para a atenuação do efeito de escala em simulações computacionais.

Já na segunda região destaca-se que 11 dos 12 pontos localizam-se acima da envoltória superior. Considerando que nas regiões finais desta bacia de dissipação a pressão média no fundo da bacia pode ser razoavelmente considerada hidrostática, conforme discutido anteriormente a partir das observações de Rajaratnam (1965a), observa-se que nestas simulações ocorreu uma superestimação da profundidade do escoamento neste ponto (d7).

Os demais pontos apresentados na Figura 5.6 localizaram-se dentro das envoltórias propostas por Teixeira et al. (2012), podendo, assim, serem considerados significativos para a representação do fenômeno. Todavia, é observado que os pontos referentes aos fluidos “FR” se apresentam mais próximos à linha central, ou seja, mais próximos aos dados medidos em protótipo. Nota-se, a partir dessa análise, que os fluidos “FR” resultaram em valores de pressão média mais próximos aos valores de protótipo em relação aos outros fluidos.

5.5 CONCLUSÕES

O estudo ora exposto apresentou resultados de simulações em CFD, realizadas no solver Ansys CFX, utilizando fluidos hipotéticos para um ressalto hidráulico submerso correspondente ao fenômeno ocorrido na estrutura de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia. Esse estudo investigou o efeito de escala nas pressões médias observadas no fundo da bacia de dissipação dessa estrutura.

Em um primeiro momento foi apresentada a definição do conceito de fluido hipotético e demonstrada a metodologia de cálculo para a alteração das propriedades físicas destes fluidos. A partir dessa alteração garantiu-se, além do critério de semelhança de Froude comumente adotado em modelos físicos hidráulicos de escoamentos a superfície livre, a preservação dos critérios de semelhança de Reynolds e Weber entre modelos e protótipo.

Os resultados obtidos nesse estudo mostram que os fluidos que tiveram sua viscosidade cinemática modificada, atendendo o critério de semelhança de Reynolds e conjunto ao critério de semelhança de Froude (índice FR), aproximaram-se mais dos resultados medidos na estrutura em escala de protótipo. Portanto, conclui-se que a não representação da magnitude correta das forças viscosas nos modelos físicos hidráulicos é a principal origem do efeito de escala nas pressões médias observadas no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Essa afirmação vai de encontro às conclusões apontadas por Tassinari (2022), o qual realizou simulações com fluidos hipotéticos para diferentes escalas de um vertedouro em degraus.

Todavia, não foi observado um padrão de resultados por agrupamento para os outros fluidos hipotéticos testados. Supõe-se que a dinâmica que envolve o escoamento em um ressalto hidráulico, bem como sua característica altamente bifásica, dificulta a identificação destes padrões por tipo de fluido ensaiado.

Vale-se ressaltar que o presente estudo investigou o efeito de escala com relação às pressões médias no fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Embora os fluidos de índice FR foram os que apresentaram melhores resultados quanto à análise do efeito de escala para esta variável, os efeitos de escala com relação às outras variáveis, neste trabalho, não foram investigados. Assim, para futuros estudos sugere-se realizar essa investigação para outras variáveis de importância, tal como pressões extremas e velocidades do escoamento.

Outro fato a ser observado é que foi utilizado o método VOF para a representação da interação fluido-ar no escoamento, o qual não representa fenômenos de aeração menores do que a escala da malha utilizada na simulação (TORRES et al., 2021). Ainda, deve-se observar que o modelo matemático utilizado se baseia nas equações médias da continuidade e as equações RANS, solucionando o problema de fechamento da turbulência com o modelo RNG $\kappa - \varepsilon$. Torna-se válido investigar o mesmo fenômeno utilizando outro método de representação de escoamentos bifásicos e utilizar outras equações governantes, tal como as utilizadas pela abordagem de simulações de grandes escalas (LES, do inglês *Large Eddy Simulation*). Ainda, sugere-se realizar estas investigações considerando um maior número de vazões simuladas.

Por fim, julga-se importante considerar que a escolha da estrutura de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia como objeto de estudo partiu do fato que haviam disponíveis dados de pressão média no fundo da bacia de dissipação para três diferentes escalas de modelo, além destes dados em escala de protótipo, os quais são raros devido à difícil instrumentação de estruturas deste porte. Todavia, ressaltos hidráulicos são fenômenos físicos altamente turbulentos e com características bifásicas expressivas, o que dificulta sua completa representação computacional.

5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, J. C. C.; AMANTE, R. C. R.; BARBOSA, V. D. **Experimental and numerical modeling of flow in a stilling basin**. Proceedings of the 36th IAHR world congress 28 June–3 July, the Hague, Netherlands. 2015
- AMORIM, J. C. C.; RODRIGUES, R. C.; MARQUES, M. G. A numerical and experimental study of hydraulic jump stilling basin. In: **Advances in Hydroscience and Engineering**. v. 4.
- ANSYS. **ANSYS CFX - Solver Theory Guide**. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2009.
- BAYON-BARRACHINA, A.; LOPEZ-JIMENEZ, P. A. Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 4, p. 662–678, 1 jul. 2015.
- BAYON, A. et al. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. **Environmental Modelling & Software**, v. 80, p. 322–335, jun. 2016.

- CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 2008.
- CHANSON, H. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 9, n. 2, p. 125–142, 2009a.
- CHANSON, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. **European Journal of Mechanics, B/Fluids**, v. 28, n. 2, p. 191–210, 2009b.
- DE PADOVA, D.; MOSSA, M. Hydraulic Jump: A Brief History and Research Challenges. **Water**, v. 13, n. 13, p. 1733, 23 jun. 2021.
- GHADERI, A. et al. Numerical Simulations of the Flow Field of a Submerged Hydraulic Jump over Triangular Macroroughnesses. **Water**, v. 13, n. 5, p. 674, 2 mar. 2021.
- HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 8
- HAGER, W. H.; BREMEN, R. Classical hydraulic jump: sequent depths. **Journal of Hydraulic Research**, v. 27, n. 5, p. 565–585, set. 1989.
- HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011.
- HELLER, V. Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling. **Journal of Hydraulic Research**, v. 55, n. 3, p. 293–309, 2017.
- HIRT, C. .; NICHOLS, B. . Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981.
- LONG, D.; STEFFLER, P. M.; RAJARATNAM, N. A numerical study of submerged hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 29, n. 3, p. 293–308, 19 maio 1991.
- MA, F.; HOU, Y.; PRINOS, P. Numerical calculation of submerged hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 39, n. 5, p. 493–503, 9 nov. 2001.
- MACIÁN-PÉREZ, J. F. et al. Analysis of the flow in a typified USBR II stilling basin through a numerical and physical modeling approach. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, 2020.
- MORTAZAVI, M. et al. Direct numerical simulation of a turbulent hydraulic jump: turbulence statistics and air entrainment. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 797, p. 60–94, 25 jun. 2016.
- NOVAK, P. et al. **Hydraulic Modelling – an Introduction**. New York: Spon Press

(Taylor & Francis), 2010.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 2, p. 244–246, 2012.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, v. 26, n. 2, p. 291–298, 2014.

RAJARATNAM, N. Submerged Hydraulic Jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 4, p. 71–96, jul. 1965.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 29, p. 123–160, 1997.

RODRIGUES, R. C. **ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE BACIA DE DISSIPACÃO**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica—Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2002.

TASSINARI, L. C. DA S. et al. Efeitos de Escala em escoamentos sobre Vertedouros em Degraus: Investigação Numérica e Computacional. **XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, p. 3023–3034, 2018.

TASSINARI, L. C. DA S. **ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS DE ALTA DECLIVIDADE: ANÁLISE DE INCERTEZAS COM UMA ABORDAGEM COMPUTACIONAL**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

TEIXEIRA, E. D. et al. Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 87–100, 2012.

TORRES, C. et al. **Determination of scale effects for a scaled physical model of a labyrinth weir using CFD**. 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, ISHS 2018.

TORRES, C. et al. Application of Three-Dimensional CFD VOF to Characterize Free-Surface Flow over Trapezoidal Labyrinth Weir and Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 147, n. 3, p. 1–19, mar. 2021.

VALERO, D.; BUNG, D. B.; CROOKSTON, B. M. Energy Dissipation of a Type III Basin under Design and Adverse Conditions for Stepped and Smooth Spillways. **Journal of**

Hydraulic Engineering, v. 144, n. 7, jul. 2018.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 8 ed. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.

YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, jul. 1992.

YALIN, M. S. **Theory of Hydraulic Models**. London: Macmillan Education UK, 1971.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma avaliação do efeito de escala em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico utilizando uma abordagem computacional.

As simulações com CFD foram realizadas através do solver Ansys CFX, utilizando uma abordagem matemática baseada nas equações médias da continuidade e RANS, utilizando o modelo de turbulência RNG $k-\epsilon$ para o fechamento das mesmas. Ainda, utilizou-se o método VOF para a modelagem da interface fluido-ar. Para comparação dos resultados e validação do modelo computacional foram utilizados dados medidos em modelos físicos hidráulicos em três diferentes escalas, além de dados em escala de protótipo, os quais foram divulgados por Teixeira (2008).

A principal variável analisada foi a pressão média no fundo da bacia de dissipação, a qual apresentou resultados satisfatórios nas simulações, principalmente nas relativas aos modelos físicos hidráulicos. As pressões médias obtidas nas simulações em escala de protótipo superestimaram os valores medidos na estrutura real. Este fato atenuou a visualização do efeito de escala ao comparar simulações em escala de modelo com a simulação em escala de protótipo, visto que são esperadas pressões médias menores nas maiores estruturas. Todavia, essa análise foi possibilitada através da comparação com os dados medidos em protótipo.

Supõe-se que parte das diferenças observadas, principalmente em relação à representação da linha d'água apresentada no item 4.5, entre os resultados das simulações com os dados medidos ocorrem devido à dificuldade de representar o fenômeno de aeração no ressalto hidráulico computacionalmente. Embora o método VOF apresente bons resultados na representação de vários fenômenos hidráulicos de superfície livre, a investigação computacional da aeração ainda é incipiente. Deve-se ressaltar que o método VOF soluciona as equações de transporte para os fluidos simulados a partir de uma fração volumétrica entre esses fluidos e que a solução é limitada à discretização utilizada, ou seja, o método não resolve a representação de pequenos volumes de fluido, tal como bolhas de ar, menores que o tamanho da malha. Entretanto, foram apresentados resultados satisfatórios na análise de variáveis que não possuem influência direta do fenômeno de aeração.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que simulações com CFD, utilizando as condições apresentadas neste estudo, são uma ferramenta de grande utilidade para a avaliação de ressaltos hidráulicos.

Por fim, nos parágrafos a seguir são apresentadas considerações relativas à utilização de fluidos hipotéticos em simulações com CFD.

Conforme apresentado no Capítulo 5 desta dissertação, a utilização de fluidos hipotéticos mostrou-se interessante quando alteradas as viscosidades dos fluidos nas simulações, a fim de atender, além do critério de semelhança de Froude, o critério de semelhança de Reynolds entre modelos e protótipo. A alteração da tensão superficial fluido-ar mostrou-se pouco eficiente para a atenuação do efeito de escala nas pressões médias, mesmo quando realizada concomitantemente à alteração da viscosidade.

Essa constatação vai ao encontro aos resultados apresentados por Tassinari (2022), o qual utilizou a abordagem de fluidos hipotéticos para a avaliação do efeito de escala em um vertedouro em degraus. O autor chegou à conclusão que a representação dos efeitos viscosos no modelo, através da alteração da viscosidade no fluido hipotético, apresenta relevância maior do que a representação dos efeitos de tensão superficial. Portanto, pode-se afirmar que a não representação dos efeitos viscosos nos modelos com a mesma magnitude destes observados em protótipo é um dos fatores relevantes para a ocorrência do efeito de escala nas pressões médias.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Abaixo são apontadas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados à temática proposta na presente dissertação:

- Realizar novas simulações com as mesmas condições e modelos utilizados nesta dissertação para as mesmas estruturas, contudo, utilizando outras vazões de referência. Os resultados medidos nos modelos físicos hidráulicos e no protótipo para outras vazões podem ser encontrados no trabalho de Teixeira (2008);
- Realizar a análise do efeito de escala para outras variáveis, além das pressões médias, para a mesma estrutura objeto da presente dissertação, também empregando a metodologia dos fluídos hipotéticos;
- Realizar a verificação da aeração em ressaltos hidráulicos através de simulações computacionais, comparando os resultados simulados com dados medidos de fração de vácuo e/ou contagem de bolhas. Ainda, sugere-se avaliar a utilização de outros métodos de solução de escoamentos bifásicos como alternativa ao VOF;
- Explorar a utilização de outras tipologias de malha, tal como malhas poliédricas, na discretização do domínio de simulação;
- Embora tenham sido verificados na revisão bibliográfica diversos trabalhos que utilizam equações RANS como modelo matemático para a simulação de ressaltos hidráulicos, sendo que parte destes utilizaram também o modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$ para o fechamento das equações, sugere-se verificar a utilização de outras abordagens matemáticas para simular este fenômeno, tal como metodologias baseadas em LES. Todavia, ao explorar estas metodologias que exigem um maior custo computacional, deve-se levar em consideração a magnitude da turbulência do fenômeno a ser explorado, a disponibilidade de computadores ou clusters com capacidade computacional suficiente para realizar as soluções, além de uma estimativa dos tempos necessários para completar as simulações com as condições desejadas;
- Explorar a utilização de outros solvers ou pacotes de softwares para solucionar o mesmo problema. Recomenda-se a utilização do software OpenFOAM, o qual é um software de código aberto para modelagem CFD, além de ter uma vasta comunidade de usuários.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, A. M. et al. Characteristics of B-Jump with Different Toe Locations. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 8, p. 938–948, ago. 1993.
- AL-HASHIMI, S. A. M.; SAEED, K. A.; NAHI, T. N. Experimental and CFD Modeling of Hydraulic Jumps Forming at Submerged Weir. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 100, n. 3, p. 487–493, 17 set. 2019.
- AMORIM, J. C. C.; AMANTE, R. C. R.; BARBOSA, V. D. **Experimental and numerical modeling of flow in a stilling basin**. Proceedings of the 36th IAHR world congress 28 June–3 July. **Anais...**Hague, Netherlands: 2015
- AMORIM, J. C. C.; RODRIGUES, R. C.; MARQUES, M. G. A numerical and experimental study of hydraulic jump stilling basin. **Advances in Hydroscience and Engineering**, v. 4, 2004.
- ANSYS. **ANSYS CFX - Solver Theory Guide**. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2009.
- BAILLY, C.; COMTE-BELLOT, G. **Turbulence**. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- BAYON-BARRACHINA, A.; LOPEZ-JIMENEZ, P. A. Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 4, p. 662–678, 1 jul. 2015.
- BAYON, A. et al. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. **Environmental Modelling & Software**, v. 80, p. 322–335, jun. 2016.
- CAROLLO, F. G.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. Sequent Depth Ratio of a B-Jump. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 6, p. 651–658, jun. 2011.
- CAROLLO, F. G.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. New Expression of the Hydraulic Jump Roller Length. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 11, p. 995–999, nov. 2012.
- CARVALHO, E. O Vertedouro de Porto Colômbia - Desempenho e Recuperação da Bacia de Dissipação. In: **Grandes Vertedouros Brasileiros**. [s.l.] Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), 2010. p. 129–138.
- CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 2008.
- CHANSON, H. Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by

Jean-Baptiste Bélanger (1828). **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 3, p. 159–163, 2009a.

CHANSON, H. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 9, n. 2, p. 125–142, 2009b.

CHANSON, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. **European Journal of Mechanics, B/Fluids**, v. 28, n. 2, p. 191–210, 2009c.

CHANSON, H. **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. London, UK: Taylor & Francis Group (IAHR monograph), 2015.

DAI PRÁ, M. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

DAI PRÁ, M. et al. Pressões Médias e Flutuantes Devidas ao Escoamento em uma Curva de Concordância Vertical entre Vertedouro e Canal Horizontal - Estudo Experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 197–207, 2012.

DE PADOVA, D.; MOSSA, M. Hydraulic Jump: A Brief History and Research Challenges. **Water**, v. 13, n. 13, p. 1733, 23 jun. 2021.

GHADERI, A. et al. Numerical Simulations of the Flow Field of a Submerged Hydraulic Jump over Triangular Macroroughnesses. **Water**, v. 13, n. 5, p. 674, 2 mar. 2021.

HAGER, W. H. B-jump in sloping channel. **Journal of Hydraulic Research**, v. 26, n. 5, p. 539–558, out. 1988.

HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 8

HAGER, W. H.; BREMEN, R. Classical hydraulic jump: sequent depths. **Journal of Hydraulic Research**, v. 27, n. 5, p. 565–585, set. 1989.

HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N. Classical hydraulic jump: length of roller. **Journal of Hydraulic Research**, v. 28, n. 5, p. 591–608, 19 set. 1990.

HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011.

HELLER, V. Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling. **Journal of Hydraulic Research**, v. 55, n. 3, p. 293–309, 2017.

HIRT, C. .; NICHOLS, B. . Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free

- boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981.
- HOHERMUTH, B.; BOES, R. M.; FELDER, S. High-Velocity Air–Water Flow Measurements in a Prototype Tunnel Chute: Scaling of Void Fraction and Interfacial Velocity. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 147, n. 11, p. 1–11, nov. 2021.
- KAWAGOSHI, N.; HAGER, W. H. B-jump in sloping channel, II. **Journal of Hydraulic Research**, v. 28, n. 4, p. 461–480, 19 jul. 1990.
- LESIEUR, M. **Turbulence in Fluids**. Fourth Rev ed. [s.l.] Springer, 2008.
- LONG, D.; STEFFLER, P. M.; RAJARATNAM, N. A numerical study of submerged hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 29, n. 3, p. 293–308, 19 maio 1991.
- LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 21, p. 43–51, out. 2018.
- MA, F.; HOU, Y.; PRINOS, P. Numerical calculation of submerged hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 39, n. 5, p. 493–503, 9 nov. 2001.
- MACIÁN-PÉREZ, J. F. et al. Experimental characterization of the hydraulic jump profile and velocity distribution in a stilling basin physical model. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 6, 2020a.
- MACIÁN-PÉREZ, J. F. et al. Analysis of the flow in a typified USBR II stilling basin through a numerical and physical modeling approach. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, 2020b.
- MARQUES, M. G. et al. **PARALELO ENTRE O COEFICIENTE DE AERAÇÃO E A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO RESSALTO HIDRÁULICO: UM ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL**. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**São Paulo: 2007
- MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. **ADIMENSIONALIZAÇÃO DE PRESSÕES MÉDIAS EM BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO**. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Belo Horizonte / MG: 1999
- MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.
- MONTEIRO, L. R. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA DE ALTA ORDEM PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ÁGUA-AR**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e

Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

MORTAZAVI, M. et al. Direct numerical simulation of a turbulent hydraulic jump: turbulence statistics and air entrainment. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 797, p. 60–94, 25 jun. 2016.

MUKHA, T.; ALMELAND, S. K.; BENSOW, R. E. Large-Eddy Simulation of a Classical Hydraulic Jump: Influence of Modelling Parameters on the Predictive Accuracy. **Fluids**, v. 7, n. 3, p. 101, 7 mar. 2022.

MURZYN, F.; CHANSON, H. Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps. **Experiments in Fluids**, v. 45, n. 3, p. 513–521, 2008.

NÓBREGA, J. D.; SCHULZ, H. E.; ZHU, D. Z. **Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis and ultrasonic sensor measurements**. 5th International Symposium on Hydraulic Structures. Hydraulic structures and society - Engineering challenges and extremes. **Anais...**Brisbane, Australia: The University of Queensland, 2014Disponível em: <<http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:329760>>

NOVAK, P. et al. **Hydraulic Modelling – an Introduction**. New York: Spon Press (Taylor & Francis), 2010.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Denver, CO: United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1984.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 2, p. 244–246, 2012.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, v. 26, n. 2, p. 291–298, 2014.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

RAJARATNAM, N. Submerged Hydraulic Jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 4, p. 71–96, jul. 1965a.

RAJARATNAM, N. The Hydraulic Jump as a Well Jet. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 5, p. 107–132, 9 set. 1965b.

RAJARATNAM, N. Hydraulic Jumps. In: **Advances in HYDROSCIENCE**. [s.l.] ACADEMIC PRESS INC., 1967. v. 4p. 197–280.

REZENDE, A. L. T. **ANÁLISE NUMÉRICA DA BOLHA DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO TURBULENTO SOBRE PLACA PLANA FINA INCLINADA**. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica—Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica

do Rio de Janeiro, 30 set. 2009.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 29, p. 123–160, 1997.

RODRIGUES, R. C. **ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE BACIA DE DISSIPACÃO**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica—Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2002.

SPALART, P. R. Strategies for turbulence modelling and simulations. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 21, n. 3, p. 252–263, jun. 2000.

TASSINARI, L. C. DA S. et al. Efeitos de Escala em escoamentos sobre Vertedouros em Degraus: Investigação Numérica e Computacional. **XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, p. 3023–3034, 2018.

TASSINARI, L. C. DA S. **ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS DE ALTA DECLIVIDADE: ANÁLISE DE INCERTEZAS COM UMA ABORDAGEM COMPUTACIONAL**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

TEIXEIRA, E. D. et al. Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 87–100, 2012.

TORRES, C. et al. **Determination of scale effects for a scaled physical model of a labyrinth weir using CFD**. 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, ISHS 2018. **Anais...2018**

TORRES, C. et al. Application of Three-Dimensional CFD VOF to Characterize Free-Surface Flow over Trapezoidal Labyrinth Weir and Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 147, n. 3, p. 1–19, mar. 2021.

TRIERWEILER, E. F. **AVALIAÇÃO DO CAMPO DE PRESSÕES EM RESSALTO HIDRÁULICO FORMADO A JUSANTE DE UMA COMPORTA COM DIFERENTES GRAUS DE SUBMERGÊNCIA**. Dissertação (Mestrado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

VALERO, D.; BUNG, D. B.; CROOKSTON, B. M. Energy Dissipation of a Type III Basin

under Design and Adverse Conditions for Stepped and Smooth Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 7, jul. 2018.

VALERO, D.; VITI, N.; GUALTIERI, C. Numerical simulation of hydraulic jumps. Part 1: Experimental data for modelling performance assessment. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–16, 2018.

VAN ALWON, J. C. **Numerical Modelling of Aerated Flows Over Stepped Spillways**. Leeds, UK: University of Leeds, 2019.

VITI, N.; VALERO, D.; GUALTIERI, C. Numerical simulation of hydraulic jumps. part 2: Recent results and future outlook. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–18, 2018.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 8 ed. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.

WIEST, R. A. **Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Formado a Jusante de um Vertedouro com Diferentes Graus de Submersão**. Dissertação (Mestrado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

WIEST, R. A. et al. Start position of a sloping hydraulic jump. **RBRH**, v. 25, p. 1–9, 2020.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3rd. ed. La Cañada, CA: DCW Industries, 2006.

YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, jul. 1992.

YALIN, M. S. **Theory of Hydraulic Models**. London: Macmillan Education UK, 1971.

YANG, W. et al. Scaling law study for earthquake induced pier–water interaction experiments. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 19, n. 1, p. 55–79, 2019.